

**UNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER
KURZZEITZUGFESTIGKEIT AN
UD - FASERVERBUNDWERKSTOFFEN UNTER
VERWENDUNG VERSCHIEDENER
VERANKERUNGSSYSTEME**

Prof.Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. M. Scheibe

Bericht: iBMB 1-93
Januar 1993

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Bericht des iBMB zum BRITE/EURAM - Forschungsvorhaben
"Fiber Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement
of Concrete"
BRITE Projekt 4142 / BREU - CT 91 0515

Inhalt

1. Untersuchungsziel
2. Wirkungsweise und Aufbau der verwendeten Verankerungen
 - 2.1 Klemmhülsenverankerung
 - 2.1.1 Material und Abmessungen der Klemmhülsen
 - 2.1.2 Bestandteile der Keilverankerung
 - 2.2 Klemmplattenverankerung
 - 2.2.1 Bestandteile der Verankerung
 - 2.2.2 Material und Abmessungen der Klemmhülsen
3. Vergußsystem
4. Versuchsablauf
5. Zugversuch
 - 5.1 Klemmhülsenverankerung
 - 5.2 Klemmplattenverankerung
 - 5.3 Versuchsdurchführung
6. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Glasfaserverbundstäben
 - 6.1 Klemmplattenverankerung
 - 6.2 Klemmhülsenverankerung (14 x 3 - M 9; l= 150 mm)
 - 6.3 Klemmhülsenverankerung (12 x 2 - M 9; l= 150 mm)
 - 6.4 Klemmhülsenverankerung (12 x 2 - M 9; l= 190 mm)
7. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Aramidfaserverbundstäben (besandet, Coillieferung)
 - 7.1 Klemmplattenverankerung
 - 7.2 Klemmhülsenverankerung (14 x 3 - M 9; l= 150 mm)
 - 7.3 Klemmhülsenverankerung (12 x 2 - M 10; l= 150 mm)
 - 7.4 Klemmhülsenverankerung (12 x 2 - M 9; l= 150 mm)

8. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Aramidfaserverbundstäben (unbesandet, Stablieferrung)

8.1 Klemmplattenverankerung

8.2 Klemmhülsenverankerung (12 x 2 - M 9; l= 190 mm)

9. Zusammenfassung

10. Literatur

1. Untersuchungsziel

Ziel der am iBMB durchgeführten Untersuchungen war die Bestimmung charakteristischer Werte der Kurzzeitzugfestigkeit von Faserverbundwerkstoffelementen (FVW) als Bezugsgröße für die Angabe von Belastungshorizonten bei statischen und dynamischen Langzeitversuchen. Verwendet wurden Glas-FVW der Fa. SICOM (Stabmaterial Cousin Freres (grün), $\varnothing = 7.5 \text{ mm}$) und Aramid-FVW der Fa. AKZO ($\varnothing = 8 \text{ mm}$). Ein Einfluß der Verankerungsart auf die Größe der Kurzzeitzugfestigkeit sollte festgestellt werden.

Verwendet wurden folgende Verankerungen:

1. Klemmhülsenverankerung (Einzelstabvergußverankerung in Kombination mit einer Klemmkeilverankerung)
2. Klemmplattenverankerung

2. Wirkungsweise und Aufbau der verwendeten Verankerungen

2.1 Klemmhülsenverankerung

Die Klemmhülsenverankerung besteht aus einer Stahlhülse mit Innengewinde, in die der FVW-Stab mit einem geeigneten Harz eingegossen wird. Die Hülse wird mit handelsüblichen Klemmkeilen und zugehöriger Buchse über Schulterlagerung verankert. Abmessungen und Steifigkeit der einzelnen Bauteile sind von entscheidender Bedeutung für die Wirkungsweise dieser Verankerung. Grundlegende Untersuchungen mit der Klemmhülsenverankerung wurden von Kepp [1] durchgeführt. Die geometrisch-mechanischen Zusammenhänge sind aus Bild 1 ersichtlich.

Die Größe der Klemmkraft ist von entscheidender Bedeutung für das Verankerungssystem. Sie beträgt ein Vielfaches der Stabkraft und hängt von der Konusneigung sowie vom Reibbeiwert zwischen Keilsegment und der Ankerbuchse ab. Im Bereich der ungeklebten Hülsenlänge wird ein Teil der Stabzugkraft bereits durch Klebverbund in die Hülse eingeleitet. Anlage 1 zeigt den Aufbau der Klemmhülsenverankerung.

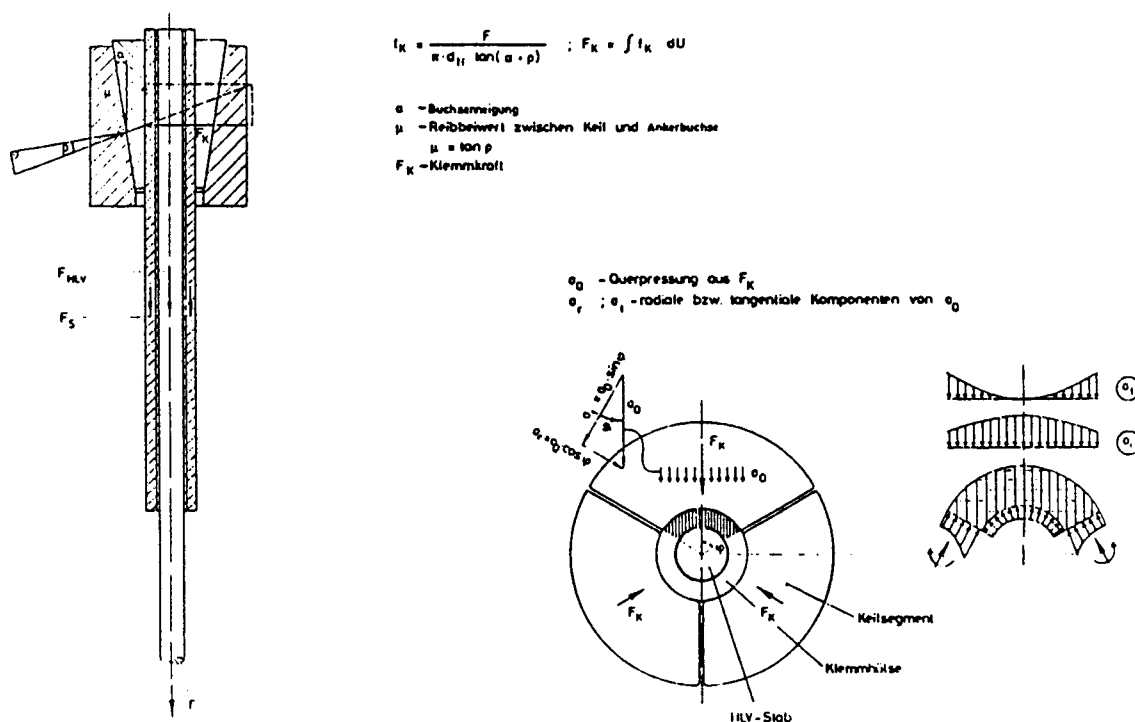


Bild 1: Kräftespiel in einer Keilverankerung [1]

2.1.1 Material und Abmessungen der Klemmhülsen

Für die am iBMB durchgeführten Versuche wurden Klemmhülsen aus Präzisionsstahlrohr St 35.4 gemäß Tabelle 1 verwendet. Das Rohrmaterial zeichnet sich durch geringe Toleranzen in Geometrie und Festigkeit aus.

Tabelle 1: Zusammenstellung der verwendeten Klemmhülsen (Lieferzustand)

Stahlgüte	Hülsenlänge [mm]	$d_a \times t^*)$ [mm]	Innenø [mm]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Streckgrenze [N/mm ²]
St 35.4	150/190	12 x 2	9	340 - 440	>220
	150	14 x 3	9		

*) $d_a \times t$ Hülsenaußendurchmesser x Wandstärke

Die Hülsen wurden bei ihrer Anlieferung stichprobenartig auf obige Parameter überprüft. Unzulässige Abweichungen entsprechend der Grenzwerte des Materials wurden nicht festgestellt. Anlage 2 zeigt eine geprüfte Stahlprobe im Vergleich zu einer ungeprüften Stahlzugprobe des gleichen Materials.

Entsprechend des Versuchsprogrammes wurde in diese Stahlhülsen ein Innengewinde M 9 bzw. M 10 eingeschnitten.

2.1.2 Bestandteile der Keilverankerung

Verwendet wurde eine Verankerung der Firma Paul Maschinenfabrik GmbH, 7941 Dürmentingen/Württemberg. Der gewählte Verankerungskörper, ein Einwandgehäuse Typ 60 wurde nach unseren Angaben bearbeitet. Tabelle 2 enthält nähere Angaben. Anlage 3 zeigt die Bestandteile.

Tabelle 2: Beschreibung der Keilverankerung

Fabrikat	Paul
Klemme	Typ 42
Teilung	3-teilig
Keillänge	70 mm
Zahnabstand	1.0 - 1.5 mm
Nachbehandlung	gehärtet, verchromt
Ankerbuchse	A 60

2.2 Klemmplattenverankerung

Bei der Verwendung der Klemmplattenverankerung werden in Klemmhülsen eingegossene Faserverbundstäbe zwischen zwei Stahlplatten geklemmt, die zur Aufnahme der Klemmhülse eine auf den Hülsendurchmesser abgestimmte halbkreisförmige Nut besitzen. Die Klemmkräfte werden mittels paarweise angeordneter Schrauben aufgebracht. Über zwischengelegte Tellerfedern wird der Querdruck konstant gehalten. Im Bereich der Klemmlänge wird die Stabkraft über Verbund zwischen dem Vergußharz und Faserverbundstab in die Klemmhülse eingeleitet und von dort über Reibungskräfte zwischen Klemmhülse und Klemmplatten auf den stählernen Ankerkörper übertragen. Bild 2 zeigt einen Querschnitt durch den Klemmbereich.

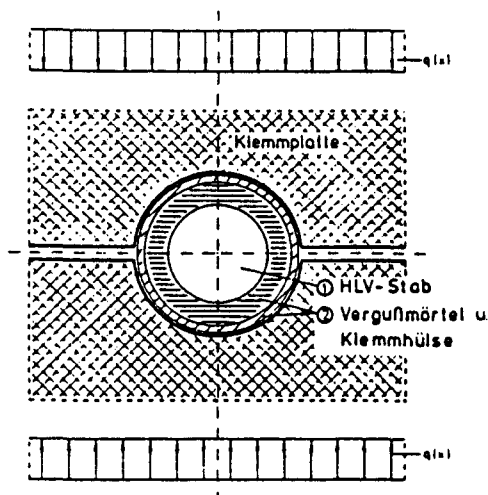


Bild 2: Querschnitt im Klemmbereich, aus [2]

2.2.1 Bestandteile der Verankerung

Die Klemmplattenverankerung besteht aus zwei Stahlplatten, die mittels hochfester Schrauben (M 10; Festigkeitsklasse 8.8) verbunden werden. Je Schraube wurden 10 Tellerfedern A 20 x 10.2 x 1.1 zwischengelegt, die zur Lastkonstanthaltung dienen. Die Anlagen 4 und 5 zeigen den Aufbau der Verankerung.

2.2.2 Material und Abmessungen der Klemmhülsen

Für die Kurzzeitzugversuche am FVW wurden Stahlhülsen der Güte entsprechend Tabelle 1 und in zwei Fällen Kupferhülsen aus gezogenem Kupferrohr verwendet. Die Hülsenlänge beträgt bei diesem Verankerungstyp 300 mm. Für die Versuche mit der Klemmplattenverankerung kamen die in Tabelle 3 aufgeführten Klemmhülsen zum Einsatz.

Tabelle 3: Zusammenstellung der verwendeten Klemmhülsen (Lieferzustand)

Güte	Hülsenlänge [mm]	$d_a \times t^*)$ [mm]	Innengewinde [mm]
St 35.4	300	12 x 2	10
Kupfer	300	12 x 1	11

*) $d_a \times t$ Hülsenaußendurchmesser x Wandstärke

3. Vergußsystem

Zur kraftschlüssigen Verbindung der Faserverbundstäbe mit der Klemmhülse diente das Vergußsystem AMPLEX SE 1 der Fa. EPUCRET GmbH, Rechberghausen. Dieses Vergußsystem ist ein lösungsmittelfreier 3-Komponenten Vergußmörtel auf Epoxidharzbasis niedriger Viskosität, der im speziellen Fall (geringer Ringspalt) ohne Füllstoffe eingesetzt wurde. Das Mischungsverhältnis der beiden Flüssigkomponenten A und B betrug 100 : 30.

4. Versuchsablauf

Die Faserverbundstäbe wurden entsprechend des Verankerungstypes und einer freien Prüflänge von 300 mm auf folgende Stablängen zugeschnitten:

Klemmhülsenverankerung:	600 mm / 680 mm
Klemmplattenverankerung:	900 mm

Die Hülsen wurden nach dem Gewindeschneiden mit Druckluft gereinigt und mit Aceton ausgewaschen. Vor dem Verkleben wurde ein Hülsenende mittels eines Holzplättchen verschlossen und mit Klebeband umwickelt. Anschließend wurden die beiden Flüssigkomponenten des Amplex-Vergußmörtels mittels eines langsam laufenden Rührwerkes miteinander vermischt. Die Klemmröhrchen wurden zu einem Drittel mit dem Gießharz verfüllt. Anschließend wurde der Faserverbundstab langsam in die Klemmhülse eingeführt. Das Fixieren der Faserverbundstäbe in den Hülsen während des Verklebens erfolgte durch eine Hilfsvorrichtung (siehe Anlage 6). Nach 24 Stunden wurde der gleiche Vorgang am anderen Stabende wiederholt. Die Versuchskörper wurden dann 7 Tage bei Normklima 20°C/65% rel. Feuchte gelagert.

5. Zugversuch

5.1 Klemmhülsenverankerung

Die Faserverbundstäbe wurden in die unter 2.1.2 beschriebene Keilverankerung eingebaut. Das Anpressen des dreiteiligen Keilsatzes in das Ankergehäuse erfolgte gleichmäßig durch eine Anpreßvorrichtung entsprechend Anlage 7. Die Aufnahme des Prüfkörpers in der Prüfmaschine erfolgte über Schulterlagerung (Anlage 8).

5.2 Klemmplattenverankerung

Die in die Klemmhülse eingegossenen Faserverbundstäbe wurden in die nutenförmige Vertiefung der Klemmplatte eingeführt. Dann erfolgte ein Anziehen der Schrauben der Klemmplatte beginnend vom lastfreien Stabende mit einem Drehmoment von 30 Nm je Schraube. Zur Aufnahme der Klemmplattenverankerung und zum Einbau in die Prüfmaschine diente die in Anlage 9 dargestellte Vorrichtung.

5.3 Versuchsdurchführung

Für die Versuche zur Bestimmung der Kurzzeitzugfestigkeit wurden die Faserverbundstäbe mittels des jeweiligen Verankerungssystems in eine Zugprüfmaschine zentrisch eingebaut. Die Belastung erfolgte kraftgeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0.5 kN/s bis zum Bruch. Die Kraftmessung erfolgte über eine prüfmaschineninterne Kraftmeßdose. Bei der Klemmhülsenverankerung erfolgten begleitend Dehnungsmessungen am Stabmaterial und an den Klemmhülsen. Die Längenänderung am Faserverbundstab wurde mittels induktiver Wegaufnehmer W5 und die Dehnungen an der Klemmhülse im keilfreien Hülsenbereich mittels DMS aufgenommen.

6. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Glasfaserverbundstäben

6.1 Klemmplattenverankerung Glas-FVW (Hülse 12 x 2 - M 10; Stahl bzw. Hülse 12 x 1 - M 11; Kupfer)

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Kurzzeitzugfestigkeit mittels der Klemmplattenverankerung wurde bei den Glasfaserverbundstäben ein Mittelwert der Kurzzeitzugfestigkeit von 1731.6 N/mm^2 erreicht.

Das Versagen trat augenscheinlich durch Materialversagen auf freier Länge auf. Dieses Versagensbild deutet darauf hin, daß die Materialfestigkeit des Glasfaserverbundstabes geweckt werden konnte und daß der gewählte Verankerungstyp in der Lage ist, gleichmäßige und reproduzierbare Versuchsergebnisse zu liefern. Der Variationskoeffizient der Versuchsserie beträgt 1.3 %. Die Untersuchungen wurden auch stichprobenartig an Hülsen aus Kupferrohr durchgeführt. Es zeigte sich, daß deren Ergebnisse im Streubereich der o.g. Versuche liegen. Die Ergebnisse der Versuche sind den Anlagen 10 und 11 zu entnehmen. Anlage 12-14 zeigen Fotografien der geprüften Versuchskörper.

6.2 Klemmhülsenverankerung Glas-FVW (Hülse 14 x 3 - M 9, l= 150 mm; Stahl)

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Kurzzeitzugfestigkeit mittels der Klemmhülsenverankerung wurde eine Kurzzeitzugfestigkeit von i.M. 1593.5 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 7.6 % erreicht. Anlage 15 enthält die Ergebnisse. Als Versagensart trat sowohl Stabauszug aus der Klemmhülse als auch augenscheinlich Materialversagen auf freier Stablänge auf. Anlage 16 und 17 zeigen die Bruchbilder. Um Vergußfehler oder eine exzentrische Stabanordnung innerhalb der Hülse feststellen zu können, wurde eine Hülse in Längsrichtung durchtrennt (siehe Anlage 18). Es ist deutlich zu erkennen, daß der Stab zentriert eingeklebt wurde und augenscheinlich keine Vergußstörungen in Folge von Fehlstellen etc. vorgelegen haben. Warum bei drei Versuchen statt Materialversagen auf freier Länge das Versagen durch Stabauszug aus der Verankerung auftrat, war Gegenstand einer weiteren Versuchsreihe (siehe 6.3). Hier wurde der Außendurchmesser der Stahlhülse auf 12 mm verkleinert, um die Querpressung auf den FVW-Stab im Keilbereich zu erhöhen.

6.3 Klemmhülsenverankerung Glas-FVW (Hülse 12 x 2 - M 9, l= 150 mm; Stahl)

In dieser Versuchsserie wurde eine Kurzzeitzugfestigkeit von i.M. 1686.3 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 1.1% erreicht. Anlage 19 enthält die Ergebnisse, Anlage 20 zeigt die Bruchbilder der Versuchskörper. Die in den Versuchen G4/1-3 und G 4/5 erzielten Werte zeigen, daß die Klemmhülsenverankerung mit o.g. Abmessungen in der Lage ist, hohe Stabkräfte sicher zu verankern. Die Versuche G 4/4 und G 4/6 zeigten ein abweichendes Bruchverhalten. Ab einer Belastung von ca. 65 kN nahmen die bis dahin mit der Belastung anwachsenden Verformungen überproportional zu, das auf Verankerungsauszug oder Stahlfließen hindeuten könnte. Daraufhin wurden die Versuche gestoppt und im Falle G 4/4 erneut belastet. Dabei kam es bei einer Zugkraft von ca. 54 kN zu einem Hülsenabriß. Anlage 21 zeigt das zugehörige Kraft-Verformungsdiagramm und das Schadensbild. Hier können im Klemmbereich erhöhte, deutlich sichtbare Verformungen der Klemmhülse wahrgenommen werden. Bei vorliegender Verankerung wird die Grenztragfähigkeit des Hülsenmaterials erreicht. Begleitende Versuche zur Krafteinleitung im Hülsenvorlängenbereich bestätigen diese Vermutung. Dazu wurde die Hülse mit jeweils zwei gegenüberliegenden DMS in Abständen von 15, 30 und 60 mm vom lastseitigen Ende versehen. In Anlage 22 sind die gemessenen Dehnungen in Abhängigkeit von der Belastung aufgetragen.

6.4 Klemmhülsenverankerung Glas-FVW (Hülse 12 x 2 - M 9, l= 190 mm; Stahl)

Die vorherigen Versuche zeigten, daß bei einer Klemmhülsenlänge von 150 mm offensichtlich ein Grenzwert der aufnehmbaren Zugkraft in der Verankerung erreicht wurde.

Für weitere Versuche standen zwei Alternativen zur Auswahl, um eventuellen Hülsenabrissen von vornherein zu begegnen:

1. Verlängerung der Klemmhülse bei gleichbleibender Materialgüte und
2. Erhöhung der Stahlgüte der Klemmhülse bei gleichbleibender Hülsenlänge.

Für die nachfolgenden Versuche wurde die Klemmhülsenlänge um 40 mm auf 190 mm vergrößert. Gleichzeitig wurde eine Zentrierung des Faserverbundstabes in der Klemmhülse vorgesehen. Anlage 23 zeigt die modifizierte Klemmhülse.

Die mit diesen Klemmhülsen durchgeführten Untersuchungen weisen einen Mittelwert der Kurzzeitzugfestigkeit von 1715.8 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 1.24 % auf. Darin zeigt sich, daß durch die Vergrößerung der Verbundlänge bei gleichzeitiger Zentrierung des Faserverbundstabes in der Klemmhülse gleichmäßig hohe Zugkräfte eingetragen werden können. Das Bruchbild der Versuchskörper G 5/1 - G 5/6 war einheitlich. Es trat ein Materialversagen auf freier Prüflänge auf. Die Ergebnisse der Versuche sind den Anlagen 24 und 25 zu entnehmen.

Betrachtet man die Versuchsergebnisse der Versuchsserien 6.4 und 6.1, so erkennt man, daß die jetzt vorliegende Klemmhülsenverankerung eine Leistungsfähigkeit erreicht hat, die der Klemmplattenverankerung gleichzusetzen ist.

7. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Aramidfaserverbundstäben (besandet, Coilllieferung)

7.1 Klemmplattenverankerung Aramid-FVW (Hülse 12 x 2 - M 10; Stahl)

Bei den durchgeführten Zugversuchen an Aramidfaserverbundstäben (ARAPREE) wurde ein Mittelwert der Kurzeitzugfestigkeit von 1241.4 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 10.7% erreicht. Die Ergebnisse sind in Anlage 26 dargestellt, die Anlagen 27 und 28 zeigen die Bruchbilder.

Die Ursache für die relativ geringen Bruchkräfte schien in Vergußfehlern begründet zu sein, die nachstehend erläutert werden. Der ARAPREE-Stab wird nach der

Fertigung als Endlosmaterial auf einer Rolle aufgewickelt. Diese wird zwecks Nacherhärtung auf ca. 120°C erwärmt. Dabei wird das Matrixharz erneut plastisch verformbar. Nach Abkühlung zeigt der Stab nach dem Abwickeln eine deutliche Krümmung. Innerhalb der Hülse bewirkt diese Krümmung ein Anliegen des Stabes an der Hülsewandung (siehe Anlage 29). Im Versuch konnte beobachtet werden, daß die meisten Prüfkörper durch eine Schädigung gerade im Übergangsbereich Stab-Hülse versagten.

In einer zweiten Versuchsserie wurde die ARAPREE-Stäbe vor dem Einkleben in die Stahlhülse noch einmal thermisch vorbehandelt. Dazu wurden die zugeschnittenen ARAPREE-Proben in Stahlhülsen (12 x 1.5) gezwängt (siehe Anlage 30), die dann bei einer Temperatur von 100 °C 90 Minuten im Trockenschrank eingelagert wurden. Nach dem Abkühlen zeigte sich, daß die ursprüngliche Verformung der ARAPREE-Proben beträchtlich zurückgegangen war (siehe Anlage 31). Diese Proben wurden dann verklebt und sieben Tage unter Normklima gelagert. Die Ergebnisse der anschließenden Prüfungen sind den Anlagen 32 und 33 zu entnehmen. Daraus wird ersichtlich, daß keine verbesserten Versuchsergebnisse erreicht werden konnten, sodaß andere Einflüsse für die Streuung verantwortlich sein mußten.

7.2 Klemmhülsenverankerung Aramid-FVW (Hülse 14 x 3 - M 9, l= 150 mm; Stahl)

Die Versuchskörper dieser Versuchsreihe versagten ausschließlich durch Auszug des Faserverbundstabes aus der Klemmhülse bei relativ niedrigen Stabkräften. Die Versuchsergebnisse sind Anlage 34 zu entnehmen. Anlage 35 zeigt die geprüften Versuchskörper. Die Versagensursache ist in einer Störung der Verbundfestigkeit zwischen Stab und Hülse zu suchen. Einfluß auf die Verbundfestigkeit hat die Staboberflächenbesandung evt. mit einer zu geringen Querpressung.

7.3 Klemmhülsenverankerung Aramid-FVW (Hülse 12 x 2 - M 10, l= 150 mm; Stahl)

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde der Hülsenquerschnitt auf 12 x 2 mm mit M 10 Innengewinde verringert. Die Besandung des Stabes im Verankerungsbereich wurde manuell entfernt. Im Gegensatz zu den unter 7.2 beschriebenen Versuchen ist die Versagensursache nicht mehr ausschließlich im Stabauszug zu suchen. Die Versuchsergebnisse sind in Anlage 36 dargestellt, Anlage 37 zeigt die Bruchbilder.

7.4 Klemmhülsenverankerung Aramid-FVW (Hülse 12 x 2 - M 9, l= 150 mm; Stahl)

Zur Vergrößerung des Hülsenquerschnittes bei gleichbleibendem Außendurchmesser wurde der Durchmesser der Gewindebohrung von M 10 auf M 9 verringert. Bei der Auswertung der Ergebnisse ist wieder die Unterteilung in zwei Kollektive mit Werten sehr hoher und niedriger Festigkeiten entsprechend Materialversagen oder Stabauszug erkennbar (siehe Anlage 38/39). Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß die Verankerung mit den o.g. Abmessungen zwar die höchsten Festigkeitswerte liefert, die Streuung insgesamt jedoch zu groß ist.

Nachdem ursprünglich von Vergußfehlern bzw. Imperfektionen am bzw. im Material bei der Probenvorbereitung (Begradigung, Entfernen der Besandung) ausgegangen wurde, erhärtete sich nach Abschluß der Versuchsserie der Verdacht, daß die Ursache der Streuung im Material selbst zu suchen ist, was später auch nachgewiesen werden konnte. In einer weiteren Versuchsserie wurde neues unbesandetes Stabmaterial untersucht, das in Form von geraden Einzelstäben von zwei Meter Länge angeliefert wurde.

8. Zusammenstellung der Ergebnisse von Kurzzeitzugfestigkeitsversuchen mit Aramidfaserverbundstäben (unbesandet, Stablieferung)

8.1 Klemmplattenverankerung Aramid-FVW (Hülse 12 x 2 - M 10; Stahl)

In dieser Versuchsserie wurden unbesandete, gerade ARAPREE- Stäbe untersucht, die in Einzelstäben angeliefert wurden. Dadurch entfielen die aufwendigen Arbeiten zur Probenvorbereitung, die unter 7.1 beschrieben wurden.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Versuchsserien mit ARAPREE wurde ein einheitliches Bruchverhalten bei gleichmäßig hohen Zugfestigkeiten i.M. von 1272.4 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 2.3 % festgestellt. Es konnte augenscheinlich ein Versagen der Proben auf freier Prüflänge nachgewiesen werden. Die Streuung der Versuchswerte deutet darauf hin, daß das untersuchte Material nur noch geringe Imperfektionen enthält. Die Ergebnisse der Versuche sind den Anlagen 40 und 41 zu entnehmen.

8.2 Klemmhülsenverankerung Aramid-FVW (Hülse 12 x 2 - M 9, l= 190 mm; Stahl)

Parallel zu den Versuchen mit der Klemmplattenverankerung wurden wiederum Versuche mit der modifizierten Klemmhülse entsprechend Anlage 23 durchgeführt. Die Ergebnisse der Kurzzeitzugfestigkeit von 1267.3 N/mm^2 bei einem Variationskoeffizienten von 2.7 % belegen, daß mit dem modifizierten Klemmhülseentyp der ARAPREE-Stab sicher verankert werden kann. Die Versuchsergebnisse und Versagensbilder sind in den Anlagen 42 und 43 dokumentiert.

9. Zusammenfassung

Unter Verwendung der Klemmplattenverankerung zur Bestimmung der Kurzzeitzugfestigkeit werden bei beiden Faserverbundmaterialien einheitlich hohe und reproduzierbare Ergebnisse erreicht.

Gleiches gilt auch für die Klemmhülsenverankerung, deren Leistungsfähigkeit als Resultat zahlreicher statischer Zugversuche optimiert wurde. Dabei zeigte sich, daß durch eine Erhöhung der Verbundlänge auf 175 mm bei gleichzeitiger Zentrierung des Faserverbundstabes in der Klemmhülse ein Wirkungsgrad des Verankerungssystem von 0.99 im Vergleich zur Klemmplattenverankerung erreicht werden konnte.

9. Literatur

- [1] Untersuchungsbericht 82649 Ke/Ha: Prüfung und Optimierung verschiedener Konstruktionselemente für die temporäre und permanente Spannkraftüberleitung aus HLV-Bewehrungssträngen in Beton- und Erdbaukörper über geeignete Verankerungssysteme - Experimentelle Untersuchungen an Klemmhülsenverankerungen, iBMB/TU Braunschweig, Braunschweig 1982
- [2] Faoro, M.: Zum Tragverhalten kunstharzgebundener Glasfaserstäbe im Bereich von Endverankerungen und Rissen in Beton, Mitteilungen des Institut für Werkstoffe im Bauwesen 1988/1, Universität Stuttgart, 1988

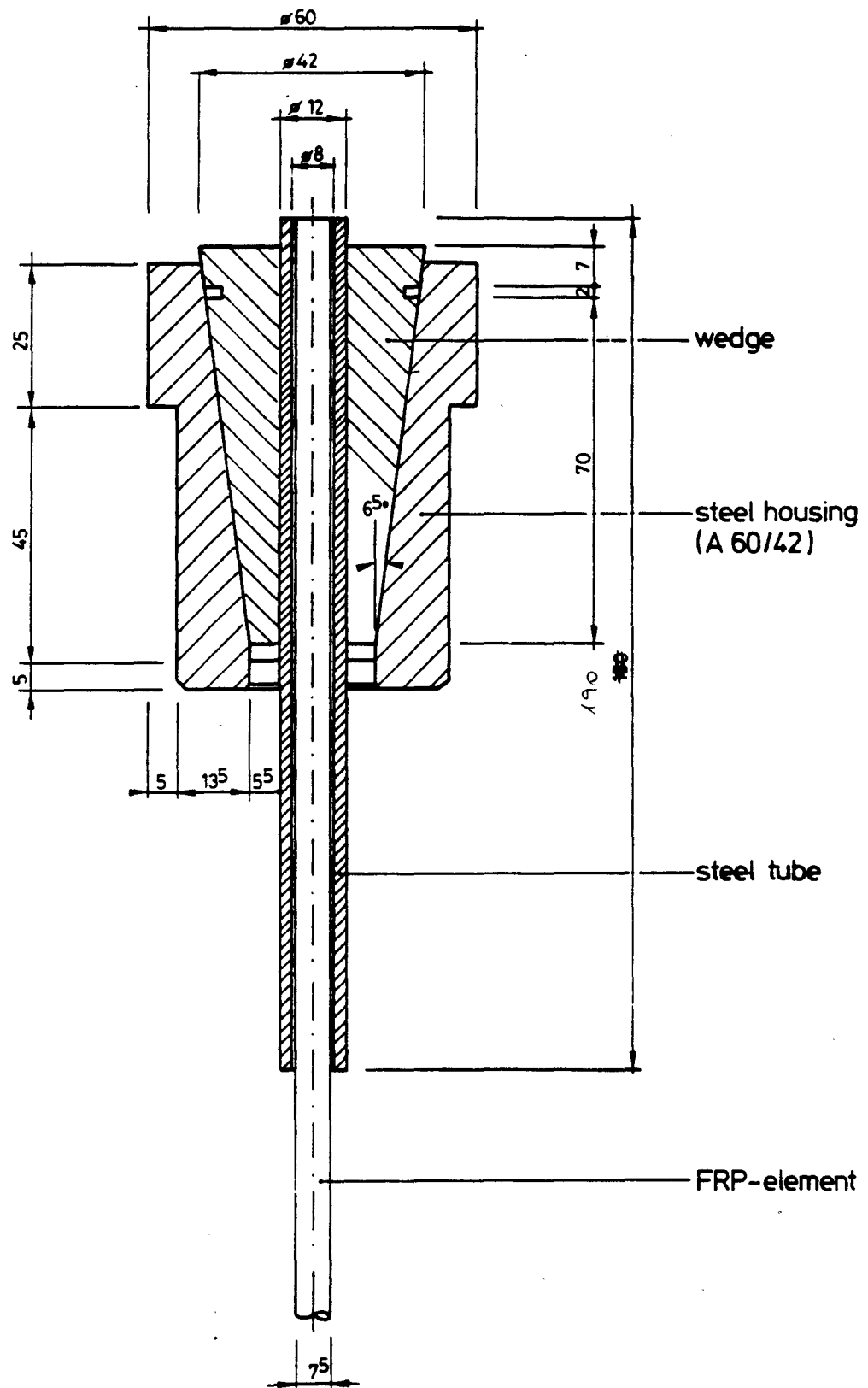


Bild 3: Aufbau der verwendeten Klemmhülsenverankerung (schematisch)

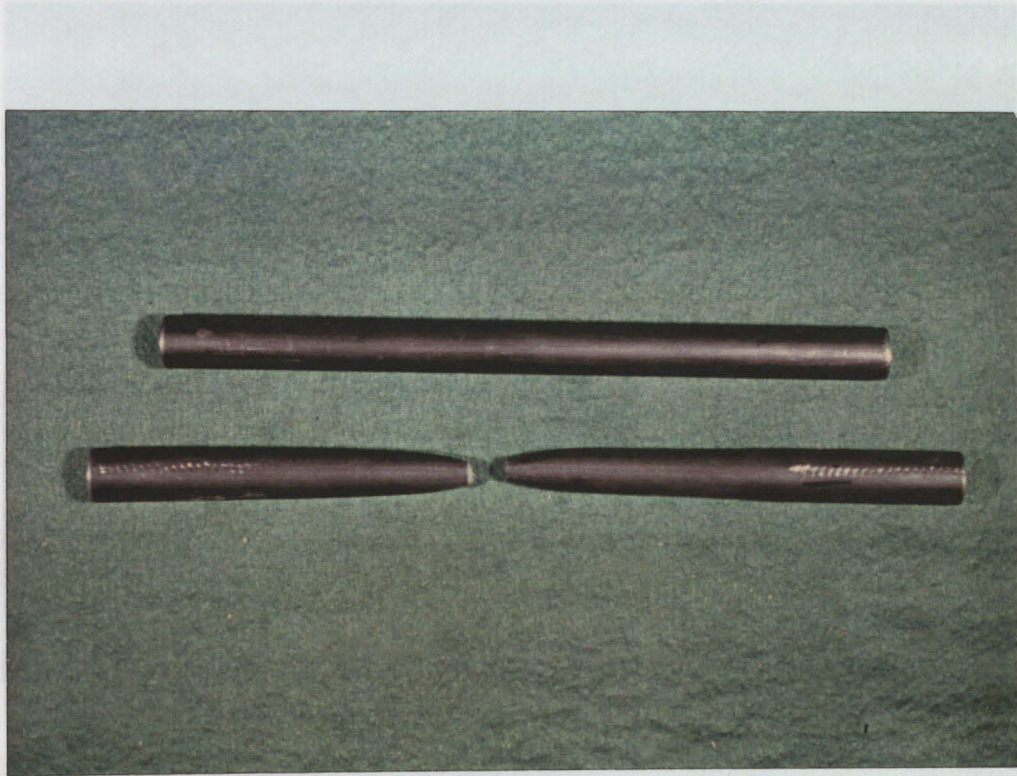


Bild 5: Darstellung der verwendeten Keilsegmente und des Ankergeläuses der Kleinkellverankerung

Bild 4: Stahlzugproben (geprüft und ungeprüft) aus St 35.4

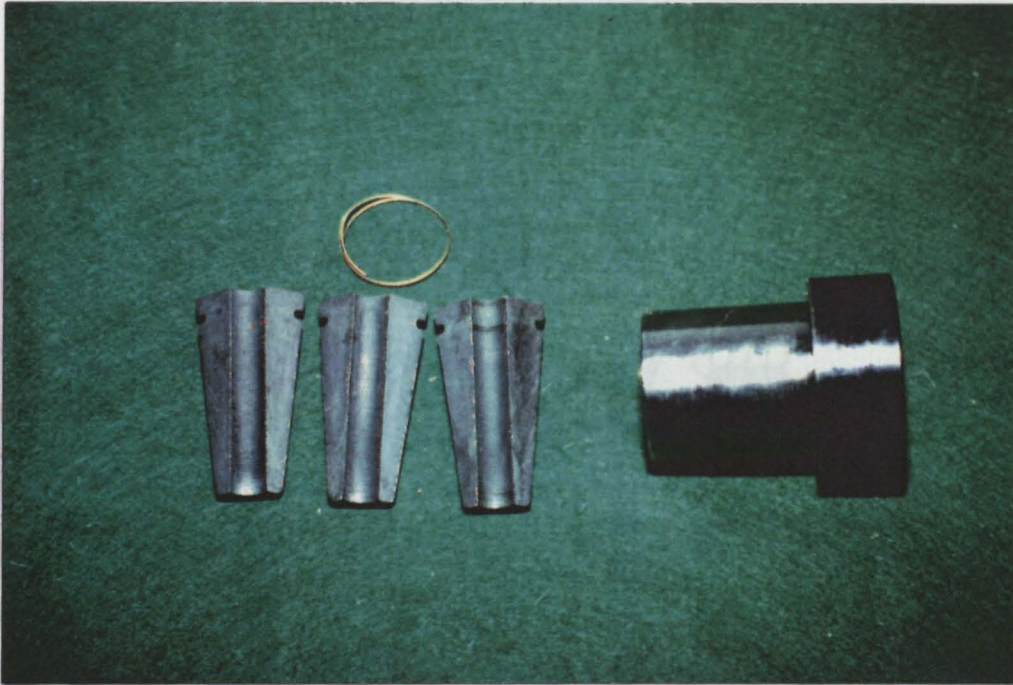


Bild 5: Darstellung der verwendeten Keilsegmente und des Ankergehäuses der Klemmkeilverankerung

Bild 6: Aufbau der Klemmplattenverankerung (schematisch)

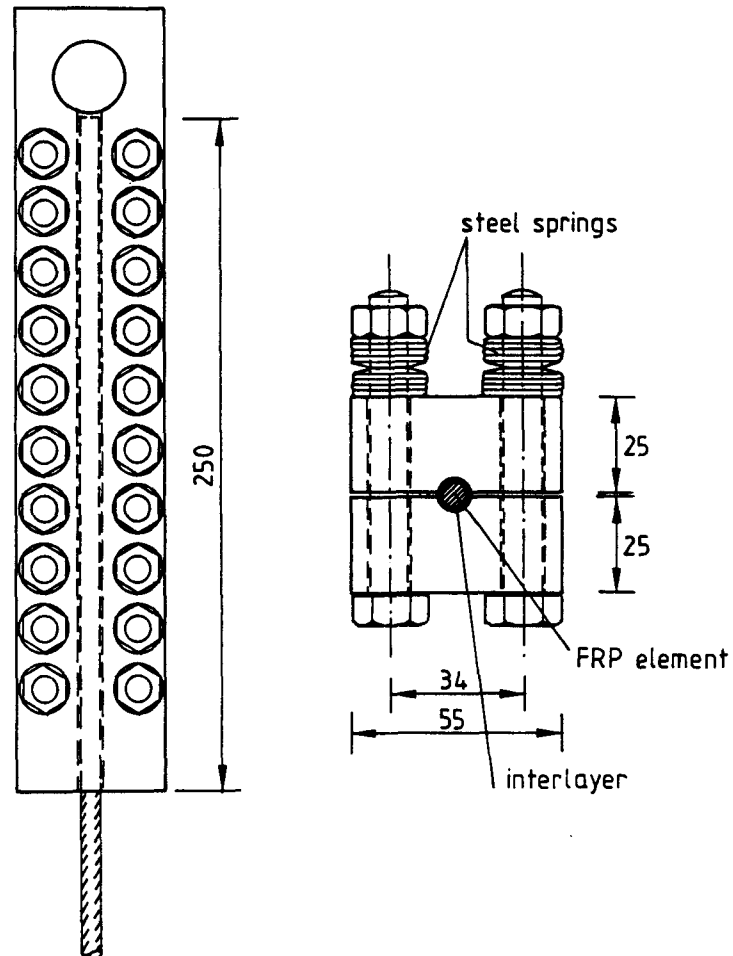


Bild 6: Aufbau der Klemmplattenverankerung (schematisch)

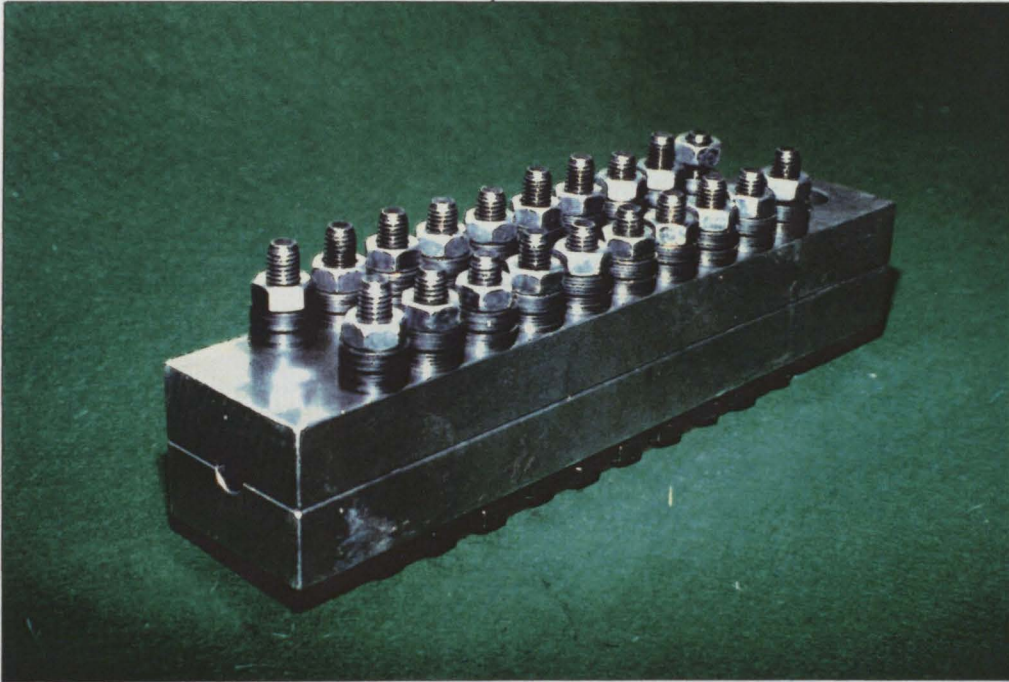


Bild 7: Klemmplattenverankerung

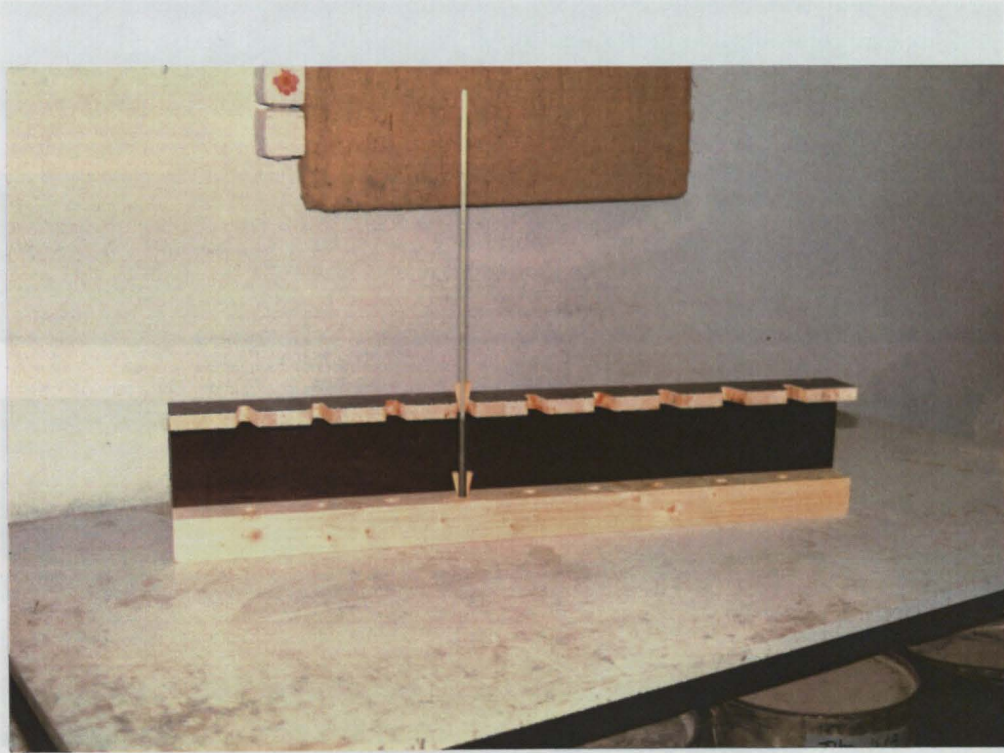


Bild 8: Hilfsvorrichtung zur Justierung der FVW in den Klemmhülsen

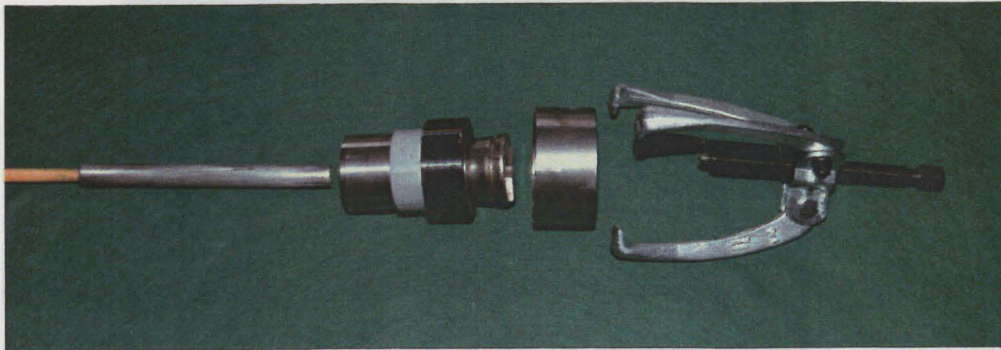
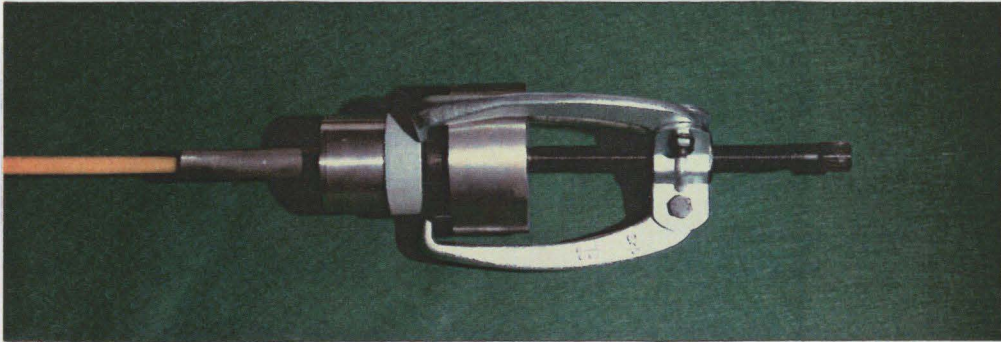


Bild 9: Vorrichtung zum Vorpressen der Keilsegmente Verankerung

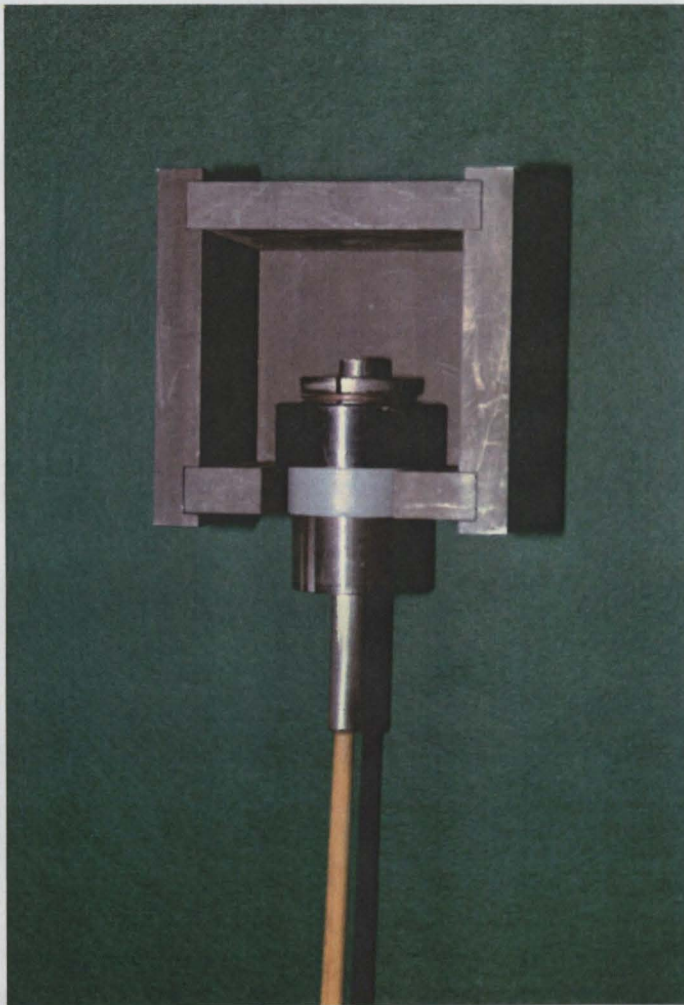


Bild 10: Schulterlagerung des Ankergehäuses der Keilverankerung

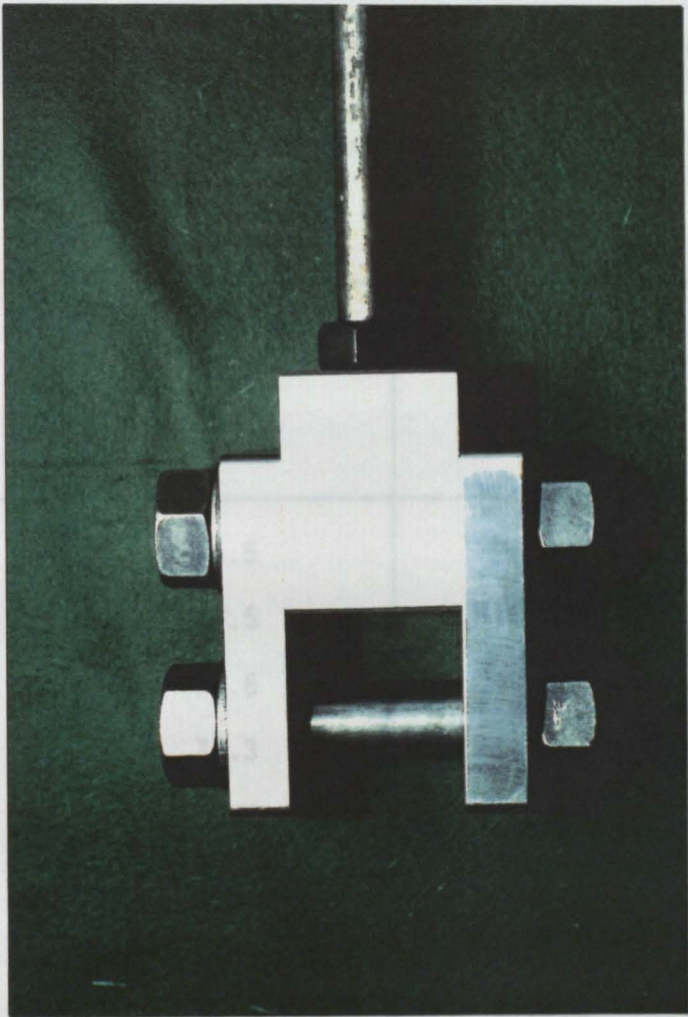


Bild 11: Vorrichtung zur Aufnahme der Klemmplattenverankerung

^{*)} bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Tabelle 4: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmplattenverankerung an Glas-FVW-Einzelstäben
 Stahlgüte der Hülse: St 35.4 / (12 x 2 - M 10)
 Verguß entsprechend Pkt 3.
 Klemmlänge: 250 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit ^{*)} [N/mm ²]	Versagensart
G 1/1	75.5	1708.9	Faserbruch
G 1/2	77.5	1754.2	Faserbruch
G 1/3	76.6	1733.8	Faserbruch
G 1/4	76.3	1727.1	Faserbruch
G 1/5	76.4	1729.3	Faserbruch
G 1/6	77.5	1754.2	Faserbruch
G 1/7	77.0	1742.9	Faserbruch
G 1/8	76.1	1722.5	Faserbruch
G 1/9	77.5	1754.2	Faserbruch
G 1/10	74.5	1686.3	Faserbruch

Mittelwert	76.5	1731.6
s	0.97	21.95
v	1.3%	1.3%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Tabelle 5: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmplattenverankerung an Glas-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Kupfer / (12 x 1.0 - M 11)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 250 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
G 3/1	78.0	1708.9	Faserbruch
G 3/2	75.2	1754.2	Faserbruch



Bild 12: Versuchskörper G1/1 - G1/5 nach statischem Zugversuch

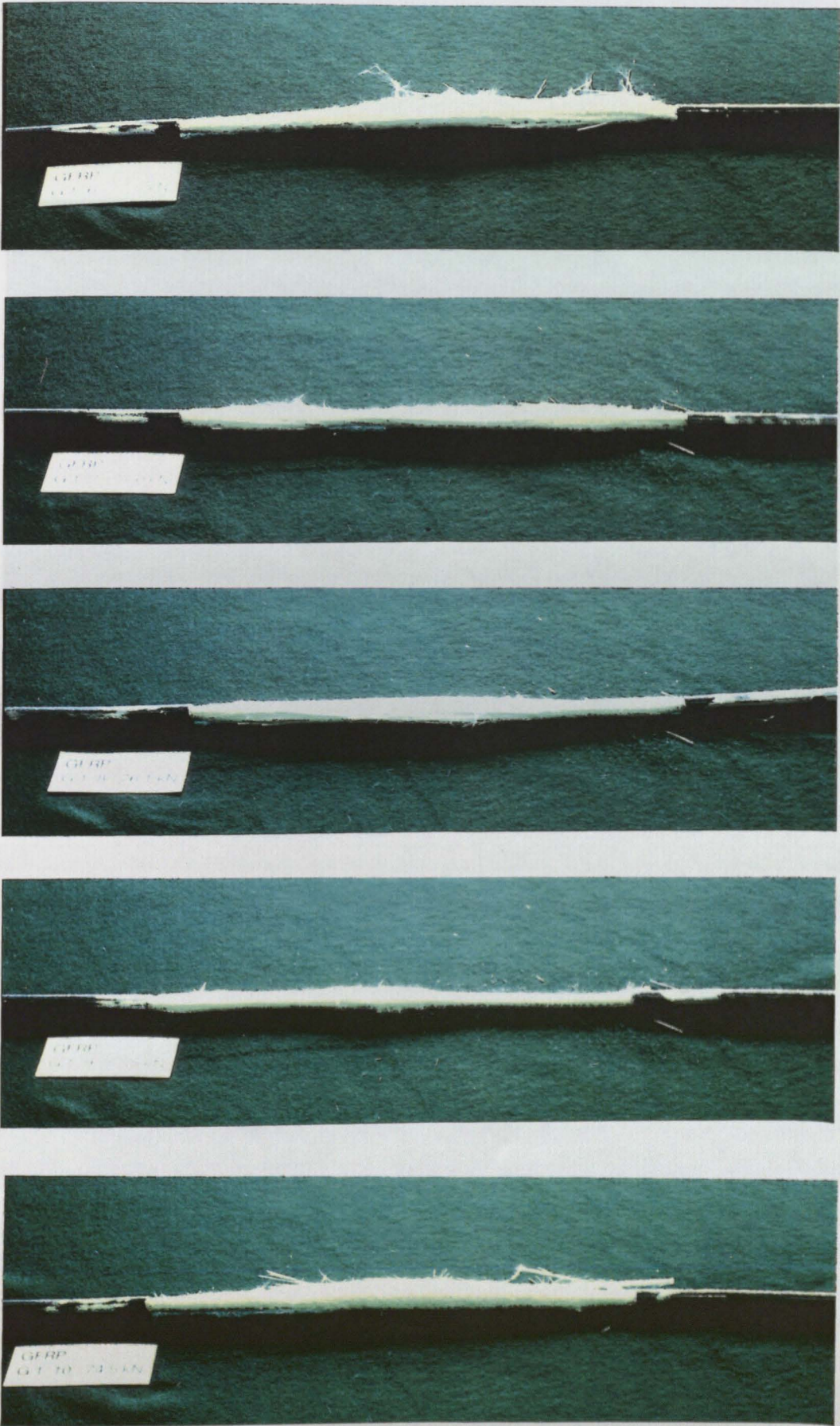


Bild 13: Versuchskörper G1/6 - G1/10 nach statischem Zugversuch

Tabelle 5: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung

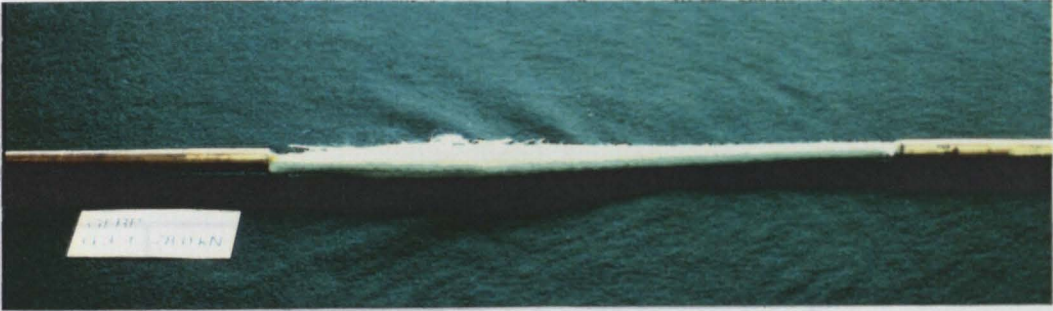


Bild 14: Versuchskörper G3/1 und G3/2 nach statischem Zugversuch

Versuchsnummer	Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit [N/mm^2]	Bruchart
G 1/1	65.5	1482.6	Faserbruch
G 2/6	70.1	1586.7	Faserbruch
G 2/7	(53.0)	(1193.7)	Stabauszug
G 2/8	66.9	1546.3	Faserbruch

Mittelwert	70.4	1593.5
s	5.35	83.2
v	7.6%	7.6%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt
Werte in () wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt

Tabelle 6: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Glas-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (14 x 3 - M 9, l= 150 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
G 2/1	73.6	1666.0	Faserbruch
G 2/2	75.9	1718.0	Faserbruch
G 2/3	77.5	1754.2	Faserbruch
G 2/4	63.7	1441.9	Faserbruch
G 2/5	(61.5)	(1392.1)	Stabauszug
G 2/6	65.5	1482.6	Faserbruch
G 2/7	70.1	1586.7	Faserbruch
G 2/8	(53.0)	(1199.7)	Stabauszug
G 2/9	(55.2)	(1299.5)	Stabauszug
G 2/10	66.9	1544.3	Faserbruch

Mittelwert	70.4	1593.5
s	5.35	85.2
v	7.6%	7.6%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Werte in () wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt

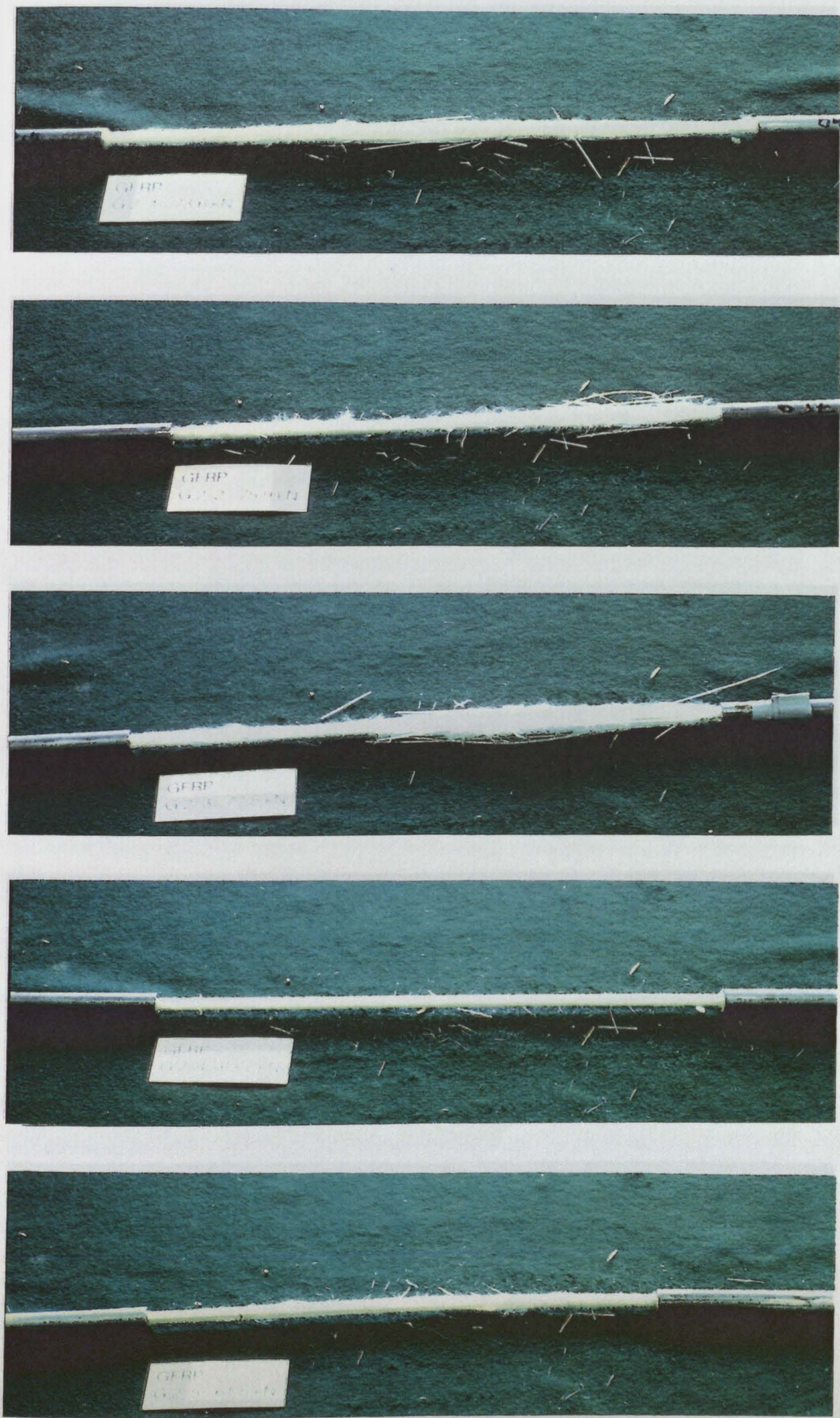


Bild 15: Darstellung der Versuchskörper G2/1 - G2/5 nach statischem Zugversuch

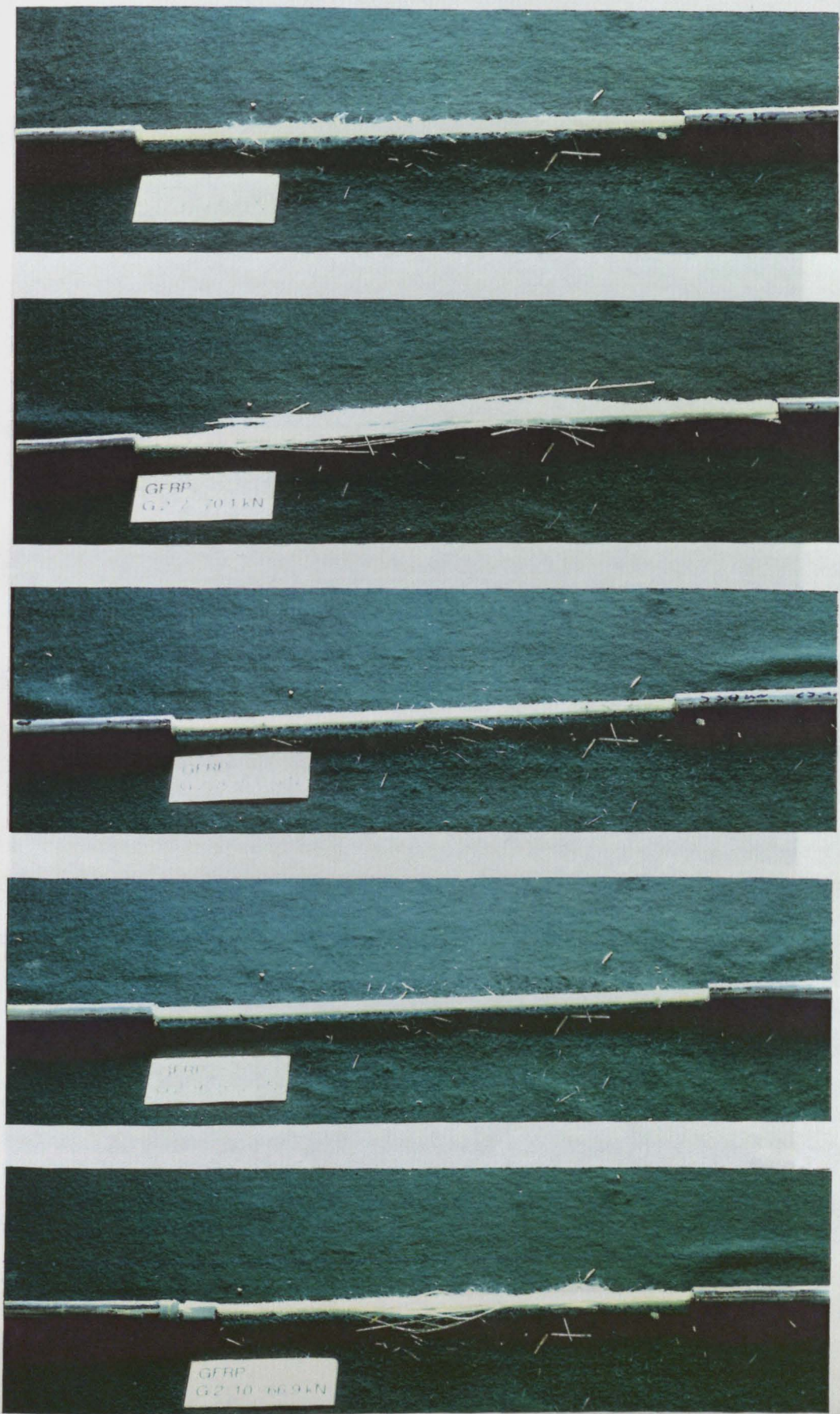


Bild 17: Längsschnitt durch eine Klemmleiste (150 mm) mit eingeklebten Glas-FVR-

Stab (Längsschnitt Stab 200)

Bild 16: Darstellung der Versuchskörper G2/6 - G2/10

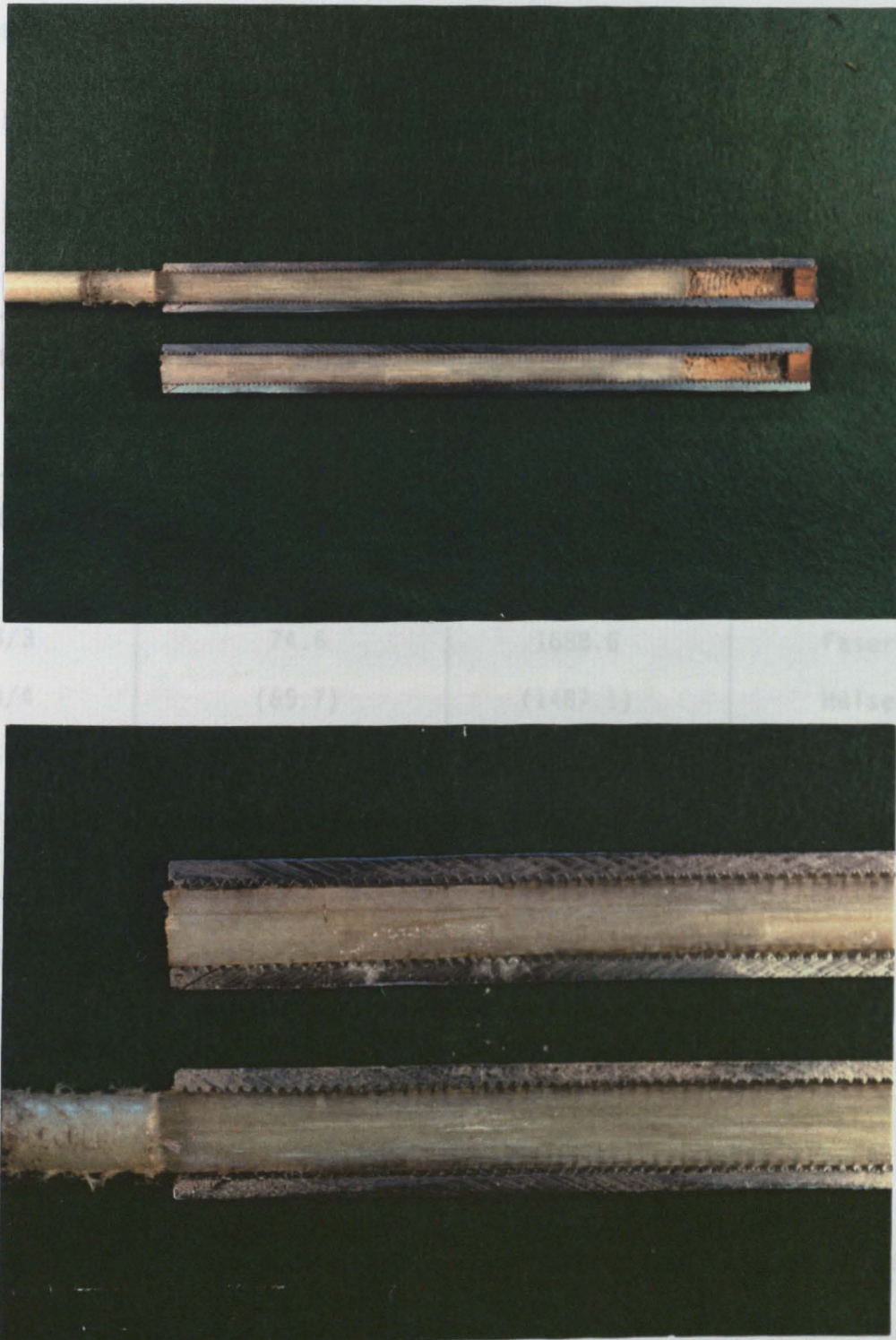


Bild 17: Längsschnitt durch eine Klemmhülse (150 mm) mit eingeklebtem Glas-FRW-Stab (Versagensart: Stabauszug)

Tabelle 7: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeiten unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Glas-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (12 x 2 - M 9, l= 150 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
G 4/1	74.8	1693.1	Faserbruch
G 4/2	75.5	1709.0	Faserbruch
G 4/3	74.6	1688.6	Faserbruch
G 4/4	(65.7)	(1487.1)	Hülsenversagen
G 4/5	73.4	1661.4	Faserbruch
G 4/6	(71.3)	(1614.0)	Hülsenversagen

Mittelwert	74.5	1686.3
s	0.87	18.5
v	1.1%	1.1%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Werte in () wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt

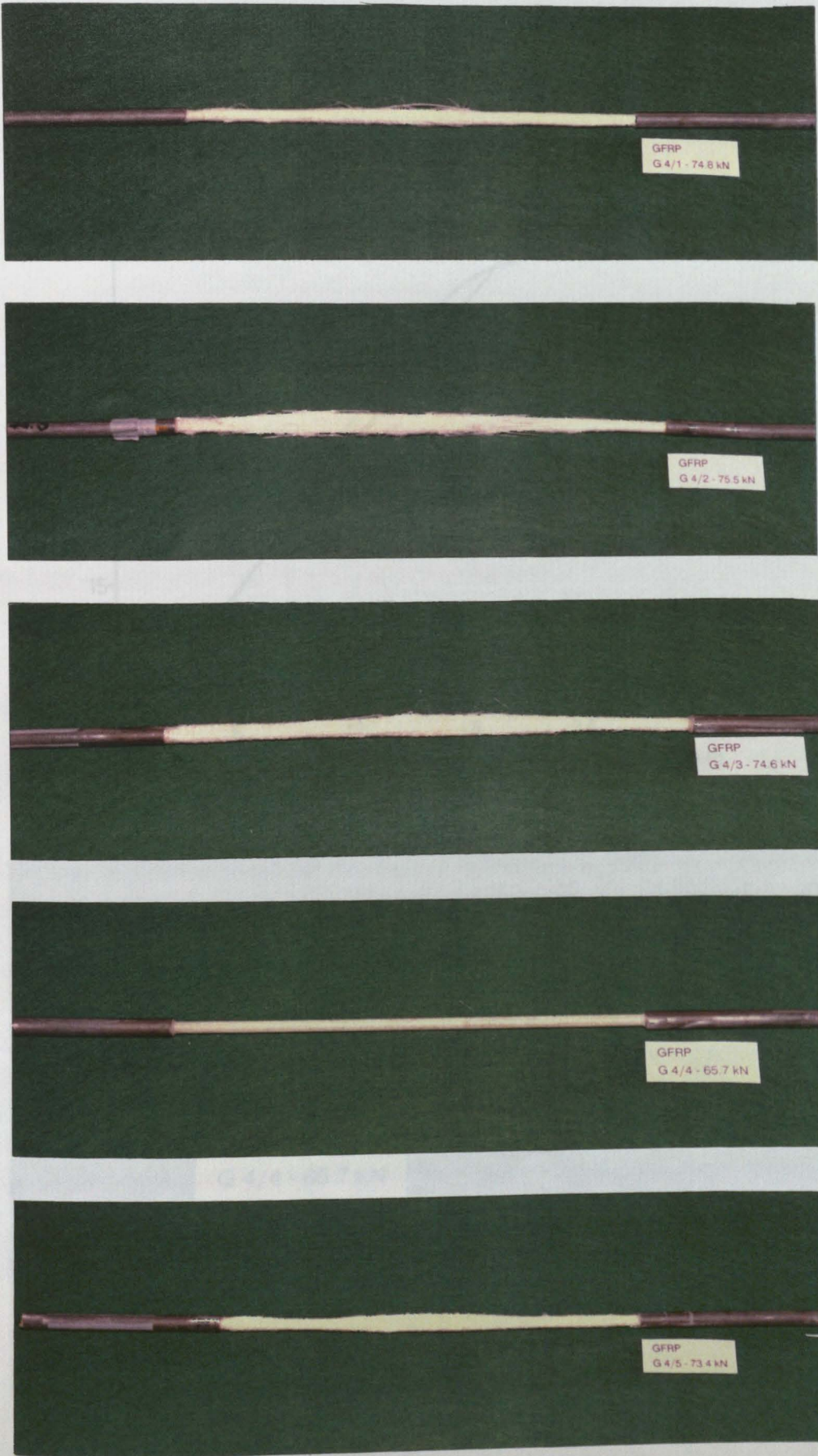


Bild 18: Darstellung der Versuchskörper G4/1 - G4/5 nach statischem Zugversuch

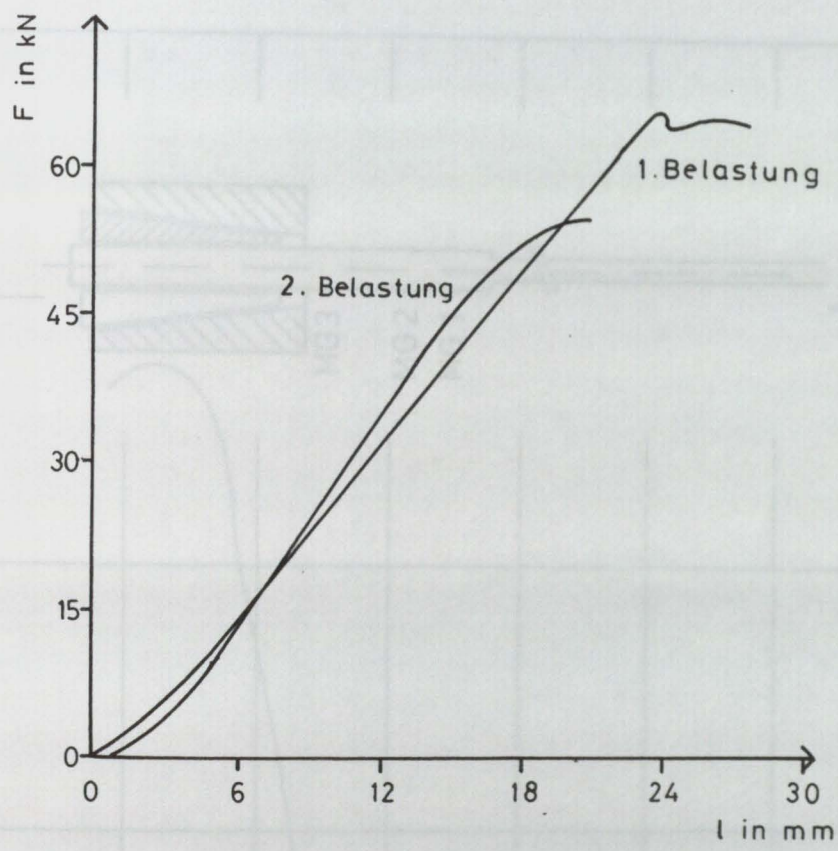


Bild 19: Versuchskörper G4/4 nach statischem Zugversuch mit Klemmhülsenabriß

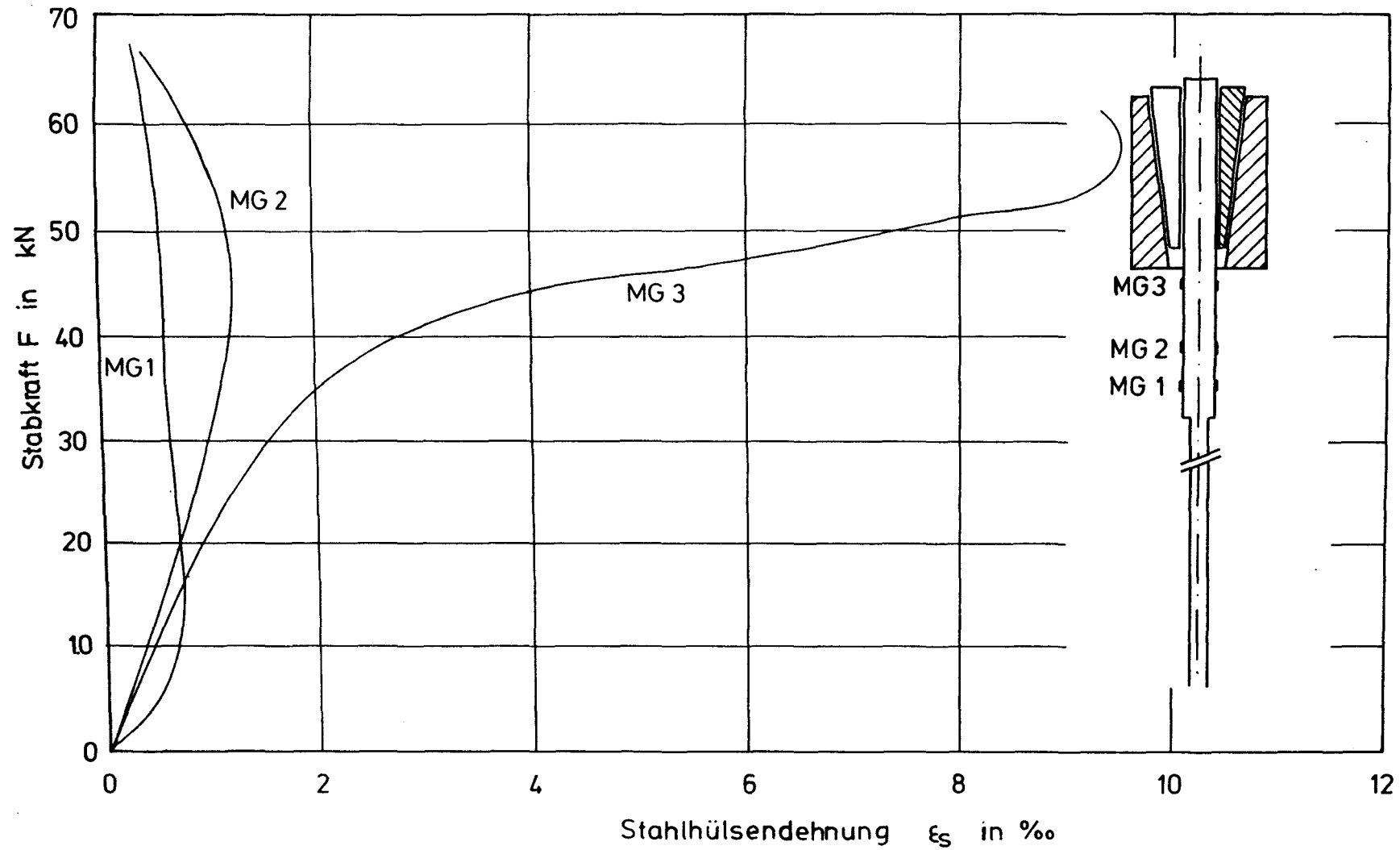


Bild 20: Lastabhängige Dehnungszunahme der Klemmhülse im keilfreien Bereich

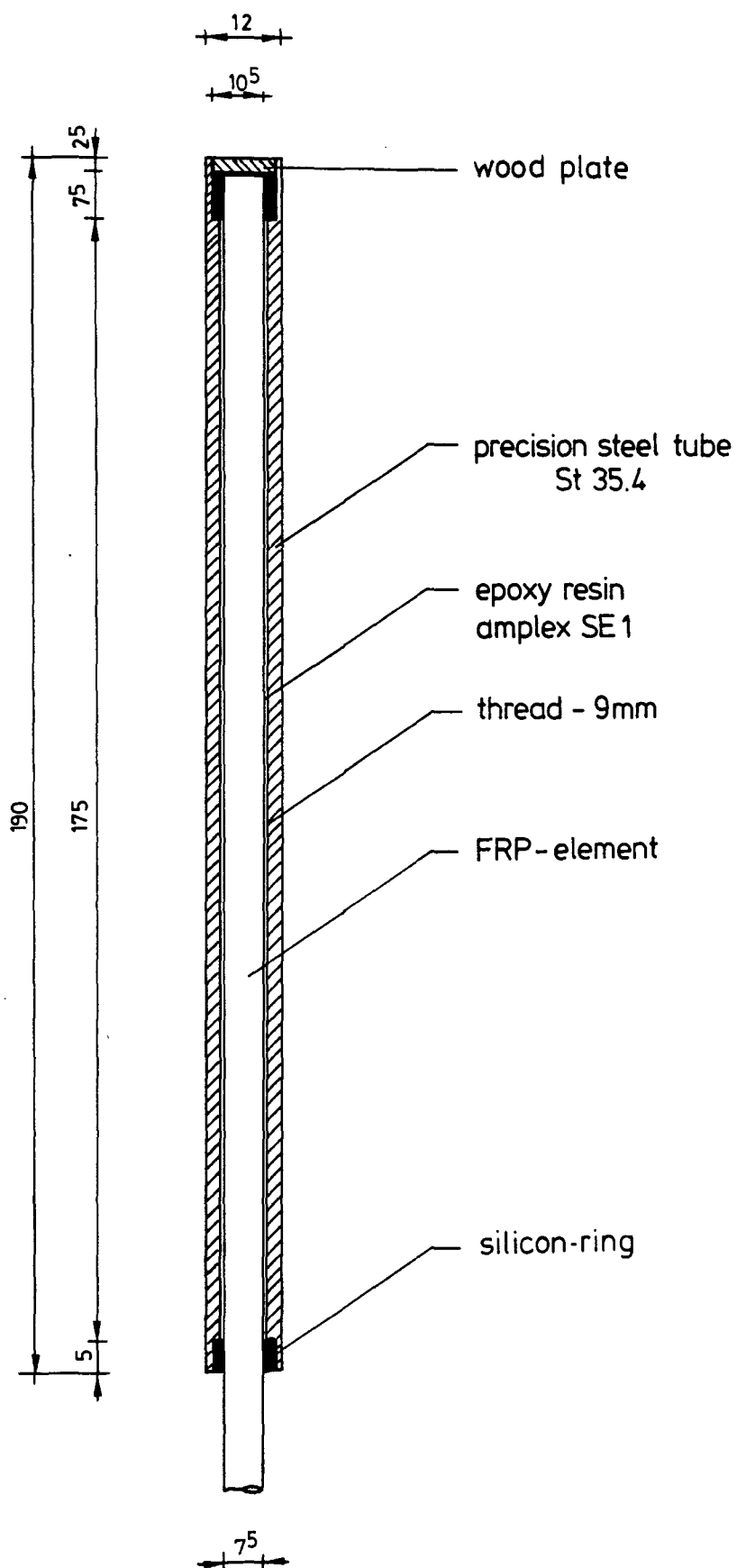


Bild 21: Modifizierte Klemmhülse (l= 190 mm) mit Zentrierung

Tabelle 8: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Glas-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (12 x 2 - M 9, l= 190 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
G 5/1	74.7	1690.9	Faserbruch
G 5/2	76.0	1720.3	Faserbruch
G 5/3	77.5	1754.2	Faserbruch
G 5/4	75.3	1704.4	Faserbruch
G 5/5	75.9	1718.0	Faserbruch
G 5/6	75.5	1709.0	Faserbruch

Mittelwert	75.8	1715.8
s	0.95	21.3
v	1.24%	1.24%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

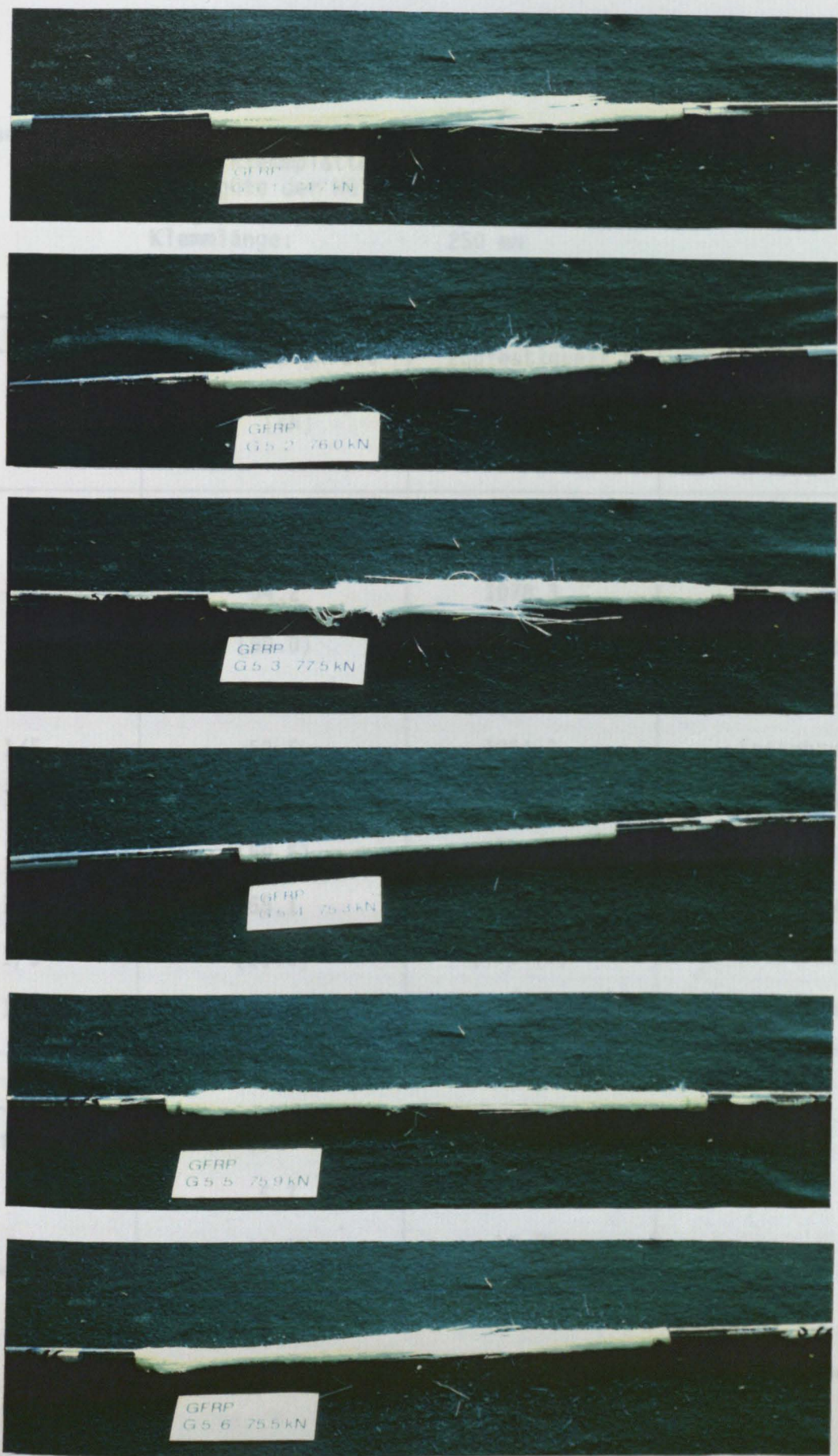


Bild 22: Darstellung der Versuchskörper G5/1- G5/6 nach statischem Zugversuch

Tabelle 9: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmplattenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben
 Stahlgüte der Hülse: St 35.4 / (12 x 2 - M 10)
 Verguß entsprechend Pkt 3.
 Klemmlänge: 250 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 1/1	68.5	1362.8	Faserbruch
A 1/2	54.2	1078.3	Faserbruch
A 1/3	(50.0)	(994.7)	Stabauszug
A 1/4	(53.0)	(1054.4)	Stabauszug
A 1/5	53.5	1064.3	Faserbruch
A 1/6	67.3	1338.9	Faserbruch
A 1/7	(50.5)	(1004.7)	Stabauszug
A 1/8	65.1	1295.1	Faserbruch
A 1/9	(51.5)	(1024.5)	Stabauszug
A 1/10	65.5	1303.1	Faserbruch

Mittelwert	62.4	1241.4
s	6.7	132.8
v	10.7%	10.7%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Werte in () wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt



Bild 23: Darstellung der Versuchskörper A1/1 - A1/5 nach statischem Zugversuch

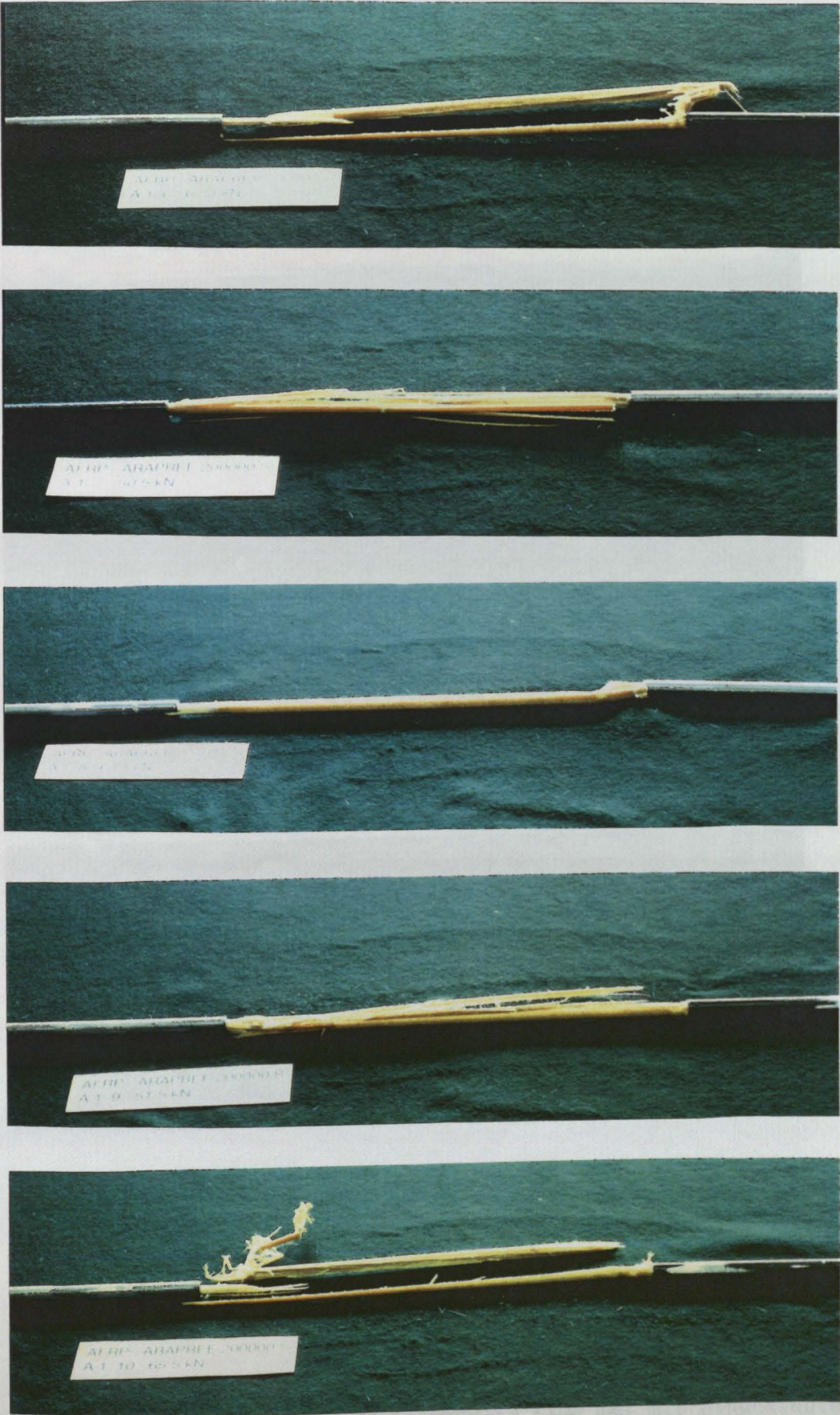


Bild 24: Darstellung der Versuchskörper A1/6 -A1/10 nach statischem Zugversuch

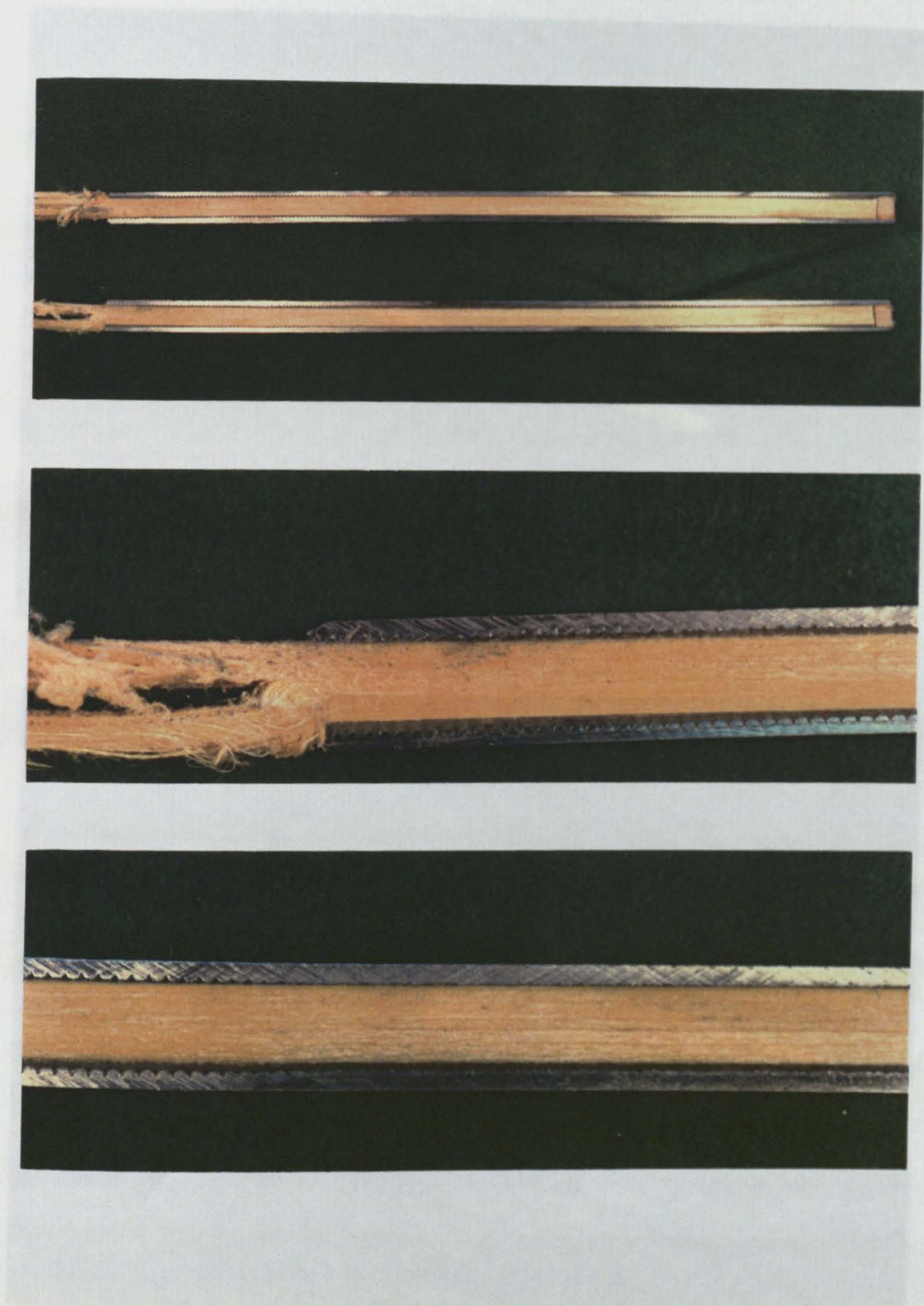


Bild 25: Längsschnitt durch eine Klemmhülse (300 mm) mit eingeklebtem Aramid-FVW-Stab



Bild 26: Gewähltes Prinzip zur Begradigung der ARAPREE-Proben

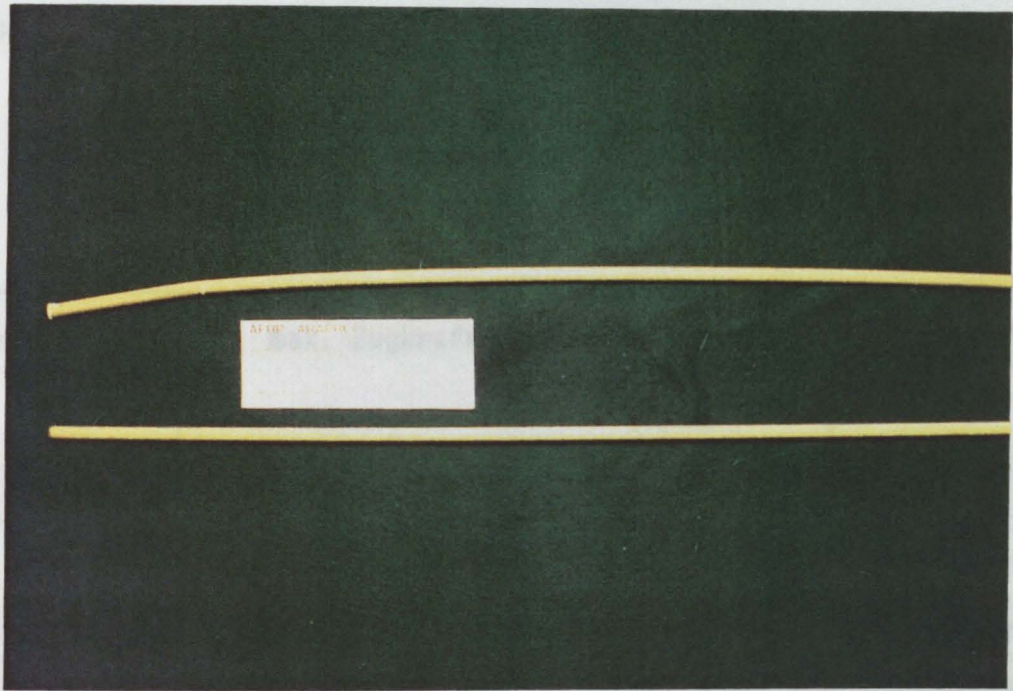


Bild 27: Ergebnis der Wärmebehandlung an ARAPREE-Proben ($T = 100^{\circ}\text{C}$ bei 90 min)

Tabelle 10: Ermittlung der Verankerungskräfte und Zugfestigkeiten unter Verwendung einer Klemmplattenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben
 Stahlgüte der Hülse: St 35.4 / (12 x 2 - M 10)
 Verguß entsprechend Pkt 3.
 Klemmlänge: 250 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 4/1	47.8	951.0	Faserbruch
A 4/2	49.2	978.8	Faserbruch
A 4/3	48.0	954.9	Faserbruch
A 4/4	66.0	1313.0	Faserbruch

Mittelwert	52.75	1049.4
s	8.85	176.1
v	16.7%	16.7%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

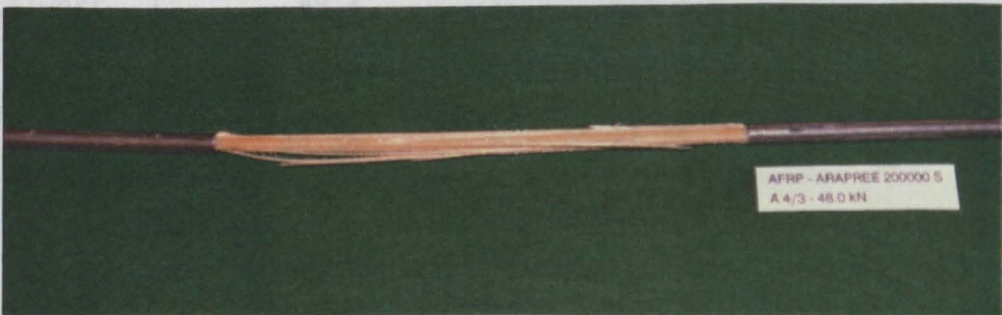
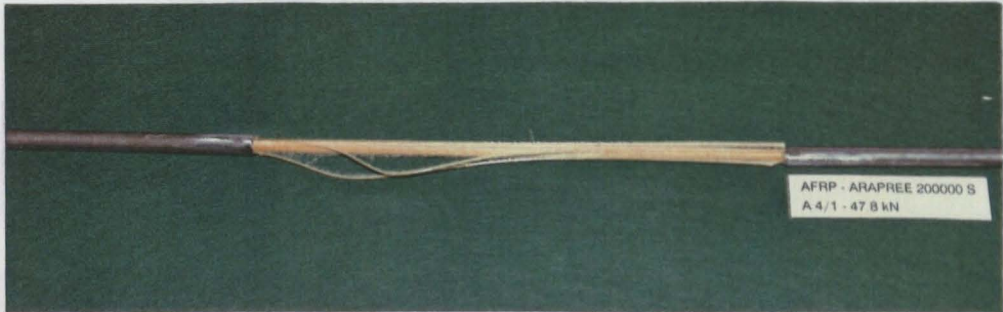


Bild 28: Darstellung der Versuchskörper A4/1 - A4/4 nach statischem Zugversuch

Tabelle 11: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Aramid-FVWP-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (14 x 3 - M 9, l= 150 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm
(Sand manuell abgeschliffen)

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 2/1	54.9	1092.3	Stabauszug
A 2/2	48.5	965.0	Stabauszug
A 2/3	42.0	835.6	Stabauszug

Mittelwert	48.4	964.3
s	6.45	128.4
v	13.3%	13.3%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Tabelle 12: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Kleinzelldruckmessung an Aramid-FK-Längsfasern
Schultermaterial: Stahl / (12 x 6 - R 10, l = 150 mm)
Vergüt entsprechend Rkt 5
Kleinfaser: 20 mm

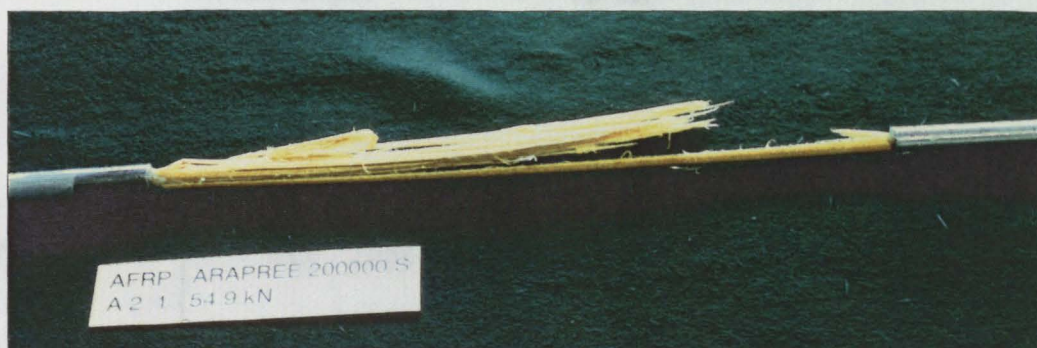


Bild 29: Darstellung der Versuchskörper A2/1 - A2/3 nach statischem Zugversuch

Tabelle 12: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (12 x 2 - M 10, l= 150 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm
(Sand manuell abgeschliffen)

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 3/1	55.4	1102.3	Faserbruch
A 3/2	51.9	1032.6	Faserbruch
A 3/3	65.7	1307.2	Faserbruch

Mittelwert	57.7	1147.4
s	7.2	142.7
v	12.4%	12.4%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt



Bild 30: Darstellung der Versuchskörper A3/1 - A3/3 nach statischem Zugversuch

Tabelle 13: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben
Hülsenmaterial: Stahl / (12 x 2 - M 9, l= 150 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm
(Sand manuell abgeschliffen)

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 5/1	51.6	1026.5	Faserbruch
A 5/2	67.8	1348.8	Faserbruch
A 5/3	(54.8)	(1090.2)	Stabauszug
A 5/4	(45.2)	(899.2)	Stabauszug
A 5/5	67.1	1334.9	Faserbruch

Mittelwert	62.1	1235.4
s	9.16	113.2
v	14.7%	14.7%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Werte in () wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt

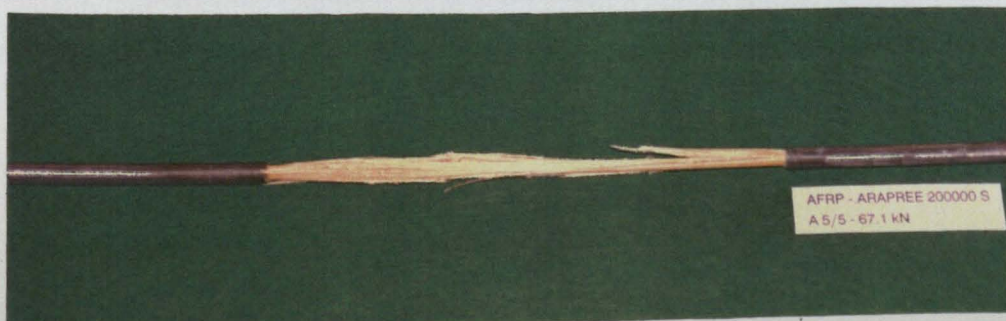
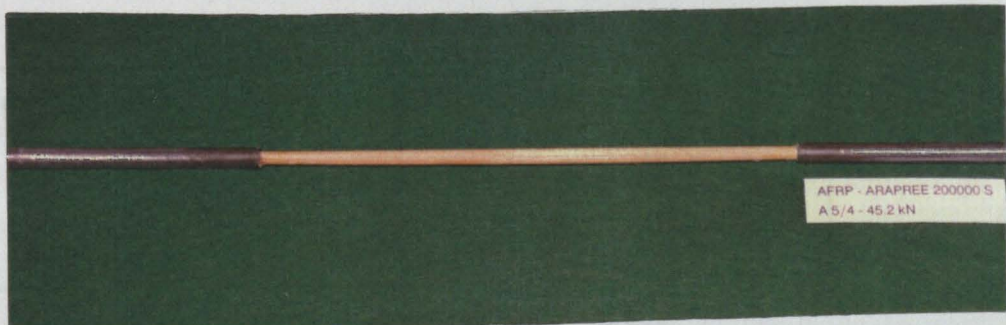
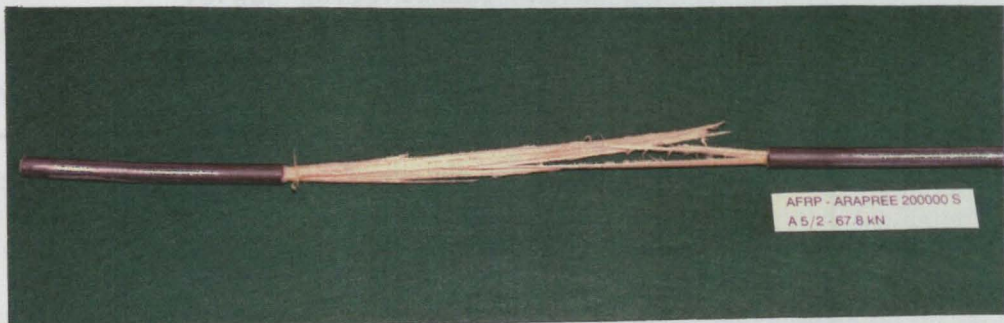
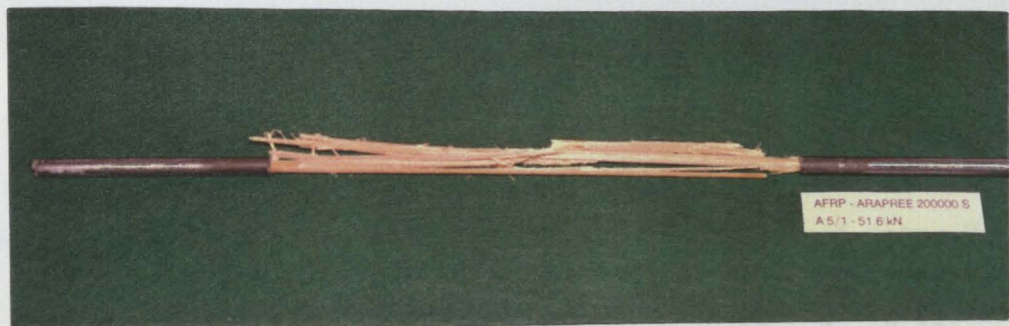


Bild 31: Darstellung der Versuchskörper A5/1 - A5/5 nach statischem Zugversuch

Tabelle 14: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmplattenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben (gerade, unbesandet)
 Stahlgüte der Hülsen: St 35.4 / (12 x 2 - M 10)
 Verguß entsprechend Pkt 3.
 Klemmlänge: 250 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit ^{*)} [N/mm ²]	Versagensart
A 6/1	62.3	1239.4	Faserbruch
A 6/2	64.7	1287.2	Faserbruch
A 6/3	64.5	1283.1	Faserbruch
A 6/4	65.8	1309.0	Faserbruch
A 6/5	62.5	1243.4	Faserbruch

Mittelwert	64.0	1272.4
s	1.5	30.0
v	2.3%	2.3%

^{*)} bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

Tabelle 18: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Kleinhölzerankerung an Aramid-Faserzugstäben (gerade, unbehandelt)
Holzmaterial: 5051 / 12 x 2 - K 1 - 10 (10 m)



Bild 32: Darstellung der Versuchskörper A6/2 - A6/4-5 nach statischem Zugversuch

Tabelle 15: Ermittlung der Zugkraft und Zugfestigkeit unter Verwendung einer Klemmhülsenverankerung an Aramid-FVW-Einzelstäben (gerade, unbesandet)
Hülsenmaterial: Stahl / (12 x 2 - M 9, l= 190 mm)
Verguß entsprechend Pkt 3.
Klemmlänge: 70 mm

Versuch	max. Zugkraft [kN]	Zugfestigkeit*) [N/mm ²]	Versagensart
A 7/1	62.4	1241.4	Faserbruch
A 7/2	62.0	1233.4	Faserbruch
A 7/3	63.8	1269.3	Faserbruch
A 7/4	66.5	1323.0	Faserbruch
A 7/5	63.8	1269.3	Faserbruch
A 7/6	65.9	1311.0	Faserbruch

Mittelwert	63.7	1267.3
s	1.76	35.0
v	2.7%	2.7%

*) bezogen auf den Faserverbundquerschnitt

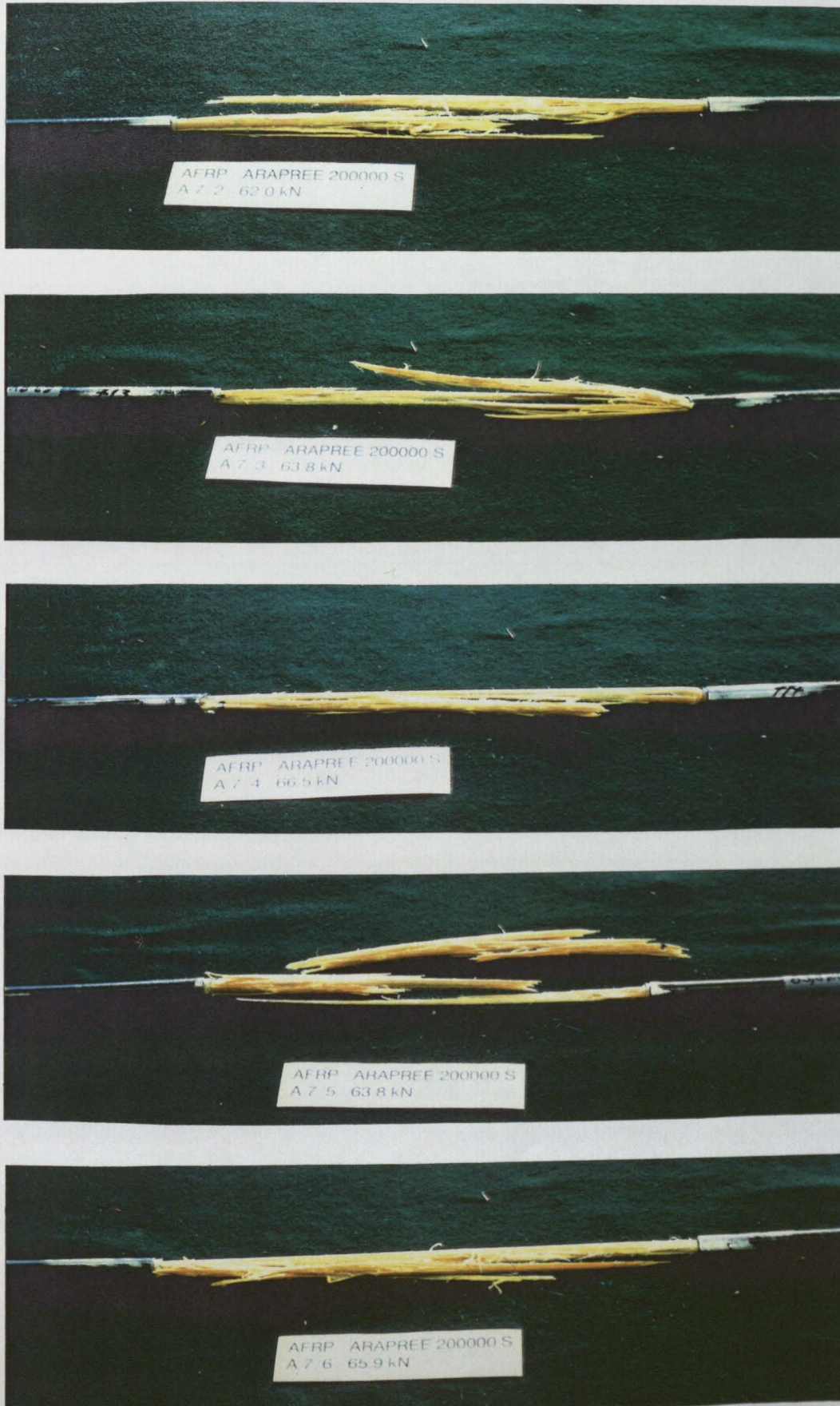


Bild 33: Darstellung der Versuchskörper A7/2 - A7/6 nach statischem Zugversuch